



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURA MIKKOLA  
ESTERIÖLJYJEN TEKNINEN SOVELTUVUUS KANTAVERKON  
SUURJÄNNITEMUUNTAJIIN

Diplomityö

Tarkastaja: lehtori Kirsi Nousiainen

Tarkastaja ja aihe hyväksytty tieto- ja  
sähkötekniikan tiedekunnan dekaanin päätöksellä 27. syyskuuta 2017

## TIVISTELMÄ

**LAURA MIKKOLA:** Esteriöljyjen tekninen soveltuvuus kantaverkon suurjännitemuuntajiin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 55 sivua

Joulukuu 2017

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: lehtori Kirsi Nousiainen

**Avainsanat:** suurjännitemuuntaja, eristysneste, synteettinen esteri, luonnollinen esteri

Kantaverkon suurjännitemuuntajissa käytetään eriste- ja jäähdytysaineena perinteisesti mineraaliöljyä. Jos mineraaliöljyä joutuu maahan öljyvuodon seurauksena, se pysyy maaperässä ja on sille haitallista. Mineraaliöljy on palava neste, jonka palamistuotteet ovat myrkyllisiä. Muuntajapalon todennäköisyys on pieni, mutta palosta aiheutuvat kustannukset ovat suuret. Muuntajapalo voi aiheuttaa vahinkoa myös ympäristölle ja ihmisille.

Luonnolliset ja synteettiset esterit ovat muuntajan palo- ja ympäristöriskejä pienentäviä vaihtoehtoja mineraaliöljyille. Esterien leimahduspiste on niin korkea, että esterimuuntajan paloriski on käytännössä olematon. Esterit ovat myös myrkyttömiä ja nopeasti biohajoavia. Suomen ilmasto-olosuhteet tuovat kuitenkin esterien muuntajakäyttöön haasteen niiden korkean viskositeetin vuoksi. Kantaverkon muuntajat sijaitsevat ulkona, missä lämpötila voi talvella pudota hyvin alas, jolloin esterien viskositeetti kasvaa ja öljyn kierto muuntajan jäähdytysjärjestelmässä hidastuu. Muuntajan käyttölämpötilat ovat häviölämmöstä johtuen niin korkeat, että käytännössä viskositeetti muodostuu ongelmaksi vain, kun muuntaja käynnistetään pitkän käyttökeskeytyksen jälkeen. Öljyn kierron hidastuminen voi johtaa muuntajan ylikuumentumiseen ja muuntajalaatikon sisäisen paineen kasvuun.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, onko kantaverkon vaatimuksiin sopivan esterieristeen suurjännitemuuntajan tekninen toteutus mahdollista. Työssä kerättiin tietoa esteriöljyistä ja esterimuuntajien toiminnasta julkaistujen tutkimustulosten sekä asiantuntijahaastatteluiden avulla. Työssä selvitettiin, poikkeako esterimuuntajan rakenne perinteisestä muuntajasta ja ovatko samat materiaalit ja lisälaitteet käyttökelpoisia. Työssä selvitettiin myös, aiheutuuko esterien alhaisesta viskositeetista merkittäviä ongelmia ja miten ne voidaan ratkaista kylmäkäynnistysilanteessa.

Työn tuloksena saatiin kerättyä tietoa esteriöljyjen ominaisuuksista ja niiden käyttäytymisestä muuntajan eristysnesteinä. Esteriöljyillä on mineraaliöljyjä heikommät sähköiset ominaisuudet. Huonompi sähkölujuus ei kuitenkaan ole ongelma, jos se otetaan huomioon muuntajan rakenteen suunnittelussa. Esterimuuntajan kunnossapito voidaan toteuttaa pääasiassa samoin kuin perinteisen muuntajan. Työssä selvisi myös, että kylmäkäynnistys alhaisissa lämpötiloissa on mahdollista muuntajaan liitettyjen pumppujen tai lämmityslaitteiden avustuksella. Kylmäkäynnistyksestä ei kuitenkaan ole julkaistuja tutkimustuloksia kantaverkkoon mahdollisesti hankittavan muuntajan kokoluokassa, joten aihe vaatii jatkotutkimuksia ennen muuntajan tilausta. Työssä kerätyn aineiston perusteella esterimuuntajan hankkimista kantaverkkoon voidaan pitää mahdollisena.

## ABSTRACT

**LAURA MIKKOLA:** Applicability of ester oils to high voltage transformers in the Finnish transmission grid  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 55 pages  
December 2017  
Master's Degree Programme in Electrical Engineering  
Major: Power Grids and Market  
Examiner: Lecturer Kirsi Nousiainen

**Keywords:** high voltage transformer, dielectric liquid, synthetic ester, natural ester

Mineral oil is traditionally used as dielectric and cooling fluid in high voltage transformers in the Finnish transmission grid. If mineral oil ends up in the ground as a consequence of an oil leak, it will not degrade and is harmful for the soil. Mineral oil is a combustible liquid and its combustion products are toxic. The probability of a transformer fire is small but the resulting costs are high.

Using natural and synthetic esters as an alternative for mineral oil reduces the fire and environmental risks of a transformer. The flash point of ester oils is high enough that the fire risk of ester transformers is effectively non-existent. Esters are also non-toxic and fully biodegradable. However, the cold climate in Finland makes using esters challenging because of their high viscosity. Transformers in the transmission grid are located outdoors, where temperature may drop very low during winter. This results in viscosity of esters growing and oil circulation in cooling system slowing down. Transformer temperatures during use are high enough that the viscosity is only a problem when the transformer is started after an outage. Overheating and increased pressure of the transformer tank might be problems during a cold start.

The aim of this thesis was to research the technical implementation of ester transformers in the Finnish transmission grid in accordance with the set requirements. Information about ester oils and operation of ester transformers was gathered from published research results and by interviewing experts. This thesis examines the differences in structure between ester transformers and traditional transformers and if similar construction materials and auxiliary devices are applicable. The thesis also highlights the significant problems resulting from high viscosity of esters and provides possible solutions to those problems during a cold start of a transformer.

This thesis presents technical information about physical and dielectric characteristics of ester oils and their behavioral as dielectric liquid in transformers. Esters have weaker dielectric properties compared to mineral oil. However, weaker dielectric strength is not a problem if it is taken into account in the transformer design. Maintenance of ester transformer is mainly similar to that of traditional transformers. A cold start at low ambient temperature can be accomplished with the help of pumps and heaters. There is, however, no existing published research about the cold start of 400 kV transformers. More research on this matter is needed before ester transformer can be put out to tender. Based on the material gathered in this thesis, construction of ester transformer meeting the requirements of the Finnish transmission grid is possible.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:ssä. Haluan kiittää Fingrid Oyj:tä mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta työskennellä osaavassa ja kannustavassa työyhteisössä.

Haluan kiittää työni ohjaajia Timo Ojasta ja Sanna Sierlaa asiantuntevista neuvoista ja innostavasta ohjauksesta työhöni liittyen. Kiitokset myös muulle ohjausryhmälle ja työtovereille, jotka ovat auttaneet minua kirjoitusprosessissa. Lisäksi haluan kiittää Tampereen teknillisen yliopiston lehtori Kirsi Nousiaista työni tarkastamisesta ja hyvistä kommentteista.

Haluan kiittää myös perhettä ja ystäviä siitä, että koko opiskeluaikani on ollut ikimuistoista. Erityiskiitokset kuuluvat Mikalle ja Pumballe, jotka tukevat minua ja auttavat jaksamaan sekä työssä että vapaalla.

Helsingissä, 20.12.2017

Laura Mikkola

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SUOMEN KANTAVERNON SUURJÄNNITEMUUNTAJAT .....	3
2.1	Fingridin suurjännitemuuntajat .....	3
2.2	Suurjännitemuuntajan rakenne .....	4
2.2.1	Rautasydän ja käämit .....	5
2.2.2	Jäähdytysjärjestelmä .....	7
2.2.3	Muut osat .....	9
2.3	Muuntajan häviöt .....	10
3.	SUURJÄNNITEMUUNTAJAN ELINKAAREN HALLINTA .....	13
3.1	Muuntajan ikääntyminen .....	13
3.2	Kunnossapito .....	14
3.3	Liuenneiden kaasujen analyysi .....	15
4.	ERISTYSNESTEET .....	19
4.1	Fysikaaliset ominaisuudet .....	19
4.2	Sähköiset ominaisuudet .....	20
4.3	Mineraaliöljy .....	22
5.	ESTERIÖLJYJEN TEKNISET OMINAISUUDET .....	25
5.1	Raaka-aineet ja rakenne .....	25
5.2	Fysikaaliset ominaisuudet .....	27
5.3	Sähköiset ominaisuudet .....	30
6.	ESTERIÖLJYJEN SOVELTUVUUS KANTAVERNON SUURJÄNNITEMUUNTAJIIN .....	33
6.1	Muuntajan rakenne ja valmistus .....	33
6.2	Esterimuuntajan lisälaitteet .....	36
6.3	Käyttö Suomen ilmasto-olosuhteissa .....	37
7.	ESTERIMUUNTAJAN ELINKAAREN HALLINTA .....	43
7.1	Ikääntyminen .....	43
7.2	Kunnossapito .....	44
7.3	Liuenneiden kaasujen analyysi .....	46
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUS .....	48
9.	YHTEENVETO .....	50
	LÄHTEET .....	51

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$C_2H_2$	asetyleeni
$C_2H_4$	etyleeni
$C_2H_6$	etaani
$C_6H_{10}O_5$	glukoosimolekyyli
$CH_4$	metaani
CO	hiilimonoksidi
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
COOR	esteriryhmä
DP-luku	Degree of Polymerisation, paperieristeen kuntoa kuvaava luku
GTL	Gas To Liquid, tekniikka, jolla maakaasusta valmistetaan öljyä
H <sub>2</sub>	vetymolekyyli
IEC	International Electrotechnical Commission
KOH	kaliumhydroksidi
ONAN	Oil natural air natural
ONAF	Oil natural air forced
OFAF	Oil forced air forced
ODAF	Oil directed air forced
ppm	parts per million, miljoonasosa
$B$	magneettivuontiheys
$\bar{D}$	sähkövuon tiheys
$\bar{E}$	sähkökentän voimakkuus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$T$	lämpötila
$\tan \delta$	häviökerroin
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti
$w$	virtausnopeus
$\Delta$	kahden arvon erotus
$\varepsilon$	permittiviteetti

# 1. JOHDANTO

Sähkön siirto kantaverkossa on sähkömarkkinalain [1] mukaan Fingrid Oyj:n (jatkossa Fingrid) vastuulla olevaa säädeltyä monopolitoimintaa. Kantaverkko on Suomen voimajärjestelmän runko, johon kuuluu yli 14000 kilometriä voimajohtoja ja yli sata sähköasemaa. Sähköasemilla sijaitsevat muuntajat mahdollistavat tehonsiirron eri jännitetasojen välillä yhden sähköjärjestelmän sisällä. Tässä työssä muuntajalla tarkoitetaan järjestelmämuuntajaa, jonka jännitetaso on 220 kV tai korkeampi.

Muuntajissa käytetään eristysmateriaalina perinteisesti mineraaliöljyä, joka on palava neste. Fingridin suurjännitemuuntajissa on yleensä 90 000–140 000 kg öljyä. Vaikka todennäköisyys mineraaliöljymuuntajan tulipalolle on vain noin 0,1 % käyttövuotta kohti, on tulipaloriski vakava. Muuntajat ovat sähköaseman kalleimpia komponentteja ja palon kustannuksia voidaan yleisesti pitää 2–3 kertaa muuntajan hankintahinnan suuruisina. Muuntajapalo voi aiheuttaa vahinkoa myös ympäristölle ja ihmisille. Muuntajapalossa syntyy paljon lämpösäteilyä ja mustaa savua, minkä seurauksena palo voi levitä ja pelastustyöt ovat haastavia. Mineraaliöljy on lisäksi haitallista ympäristölle joutuessaan maaperään mahdollisen öljyvuodon seurauksena. [2] [3] [4]

Mineraaliöljymuuntajien ympäristö- ja paloriskin vuoksi muuntajakäyttöön on alettu kehittää vaihtoehtoisia öljyjä. Uusille öljyille on asetettu vaatimukset biohajoavuudesta ja korkeasta syttymislämpötilasta. Esteriöljyt täyttävät öljyjen ympäristövaatimukset, mutta ovat muuntajan eristyskäyttöön joiltain ominaisuuksiltaan huomattavasti mineraaliöljyä huonompia. Esterien suurin ongelma on niiden korkea viskositeetti, jonka vuoksi niiden käyttö kylmissä ilmasto-olosuhteissa vaatii erityistoimenpiteitä muuntajan suunnittelussa, valmistuksessa ja käytössä. Esterit voidaan jakaa rakenteensa perusteella kahteen eri tyyppiin: synteettisiin ja luonnollisiin estereihin. Esterityyppien raaka-aineet ja valmistustapa ovat erilaiset ja ne poikkeavat teknisiltä ominaisuuksiltaan jonkin verran toisistaan. [5]

Esteriöljyjä on maailmalla jo melko laajasti käytössä jakelumuuntajissa ja erikoismuuntajissa, mutta suurjännitemuuntajakäytössä esterit ovat vielä harvinaisia. Ensimmäinen esterieristeinen, 400 kV:n jännitetason järjestelmämuuntaja koestettiin onnistuneesti Siemensin Nürnbergin tehtaalla vuonna 2013. Muuntajan nimellisjännite on 420 kV ja se on täytetty luonnollisella esterillä. [6] Vuonna 2015 Englannin ja Walesin siirtoverkon omistava National Grid tilasi Siemensiltä kolme synteettisellä esterillä eristettyä muuntajaa keskellä Lontoota sisätiloissa sijaitsevalle Highburyn sähköasemalle. Muuntajat ovat

käytössä 400 kV:n verkossa. [7] Nykyiset esterieristeiset suurjännitemuuntajat ovat käytössä Suomea lämpimämissä ilmasto-olosuhteissa, joten käyttökokemuksia pakkaolosuhteissa ei vielä ole olemassa.

Tämä diplomityö tehdään osana Fingridin tutkimus- ja kehitysprojektia, jonka tarkoituksena on selvittää esterioöljyjen käyttömahdollisuuksia kantaverkkoon hankittavissa uusissa 400 kV:n suurjännitemuuntajissa. Tämä työ keskittyy tutkimaan esterioöljyjen teknistä soveltuvuutta käytettäväksi suurjännitemuuntajissa Suomen ilmasto-olosuhteissa. Teknistä soveltuvuutta arvioidaan aikaisempien tutkimusten sekä asiantuntijoiden haastattelujen perusteella. Työssä haastateltiin synteettisten esterien markkinajohtaja Midel 7131 –öljyn valmistajan M&I Materialsin edustajaa, Fingridille öljyanalyyseja tekevän öljylaboratorio VPdiagnosen asiantuntijaa ja esteritäytteisiä suurjännitemuuntajia valmistaneen Siemensin asiantuntijoita. Työn tavoitteena on erityisesti selvittää, kuinka merkittäviä ongelmia esterien korkea viskositeetti tuo niiden käyttöön muuntajan eristeenä kantaverkossa ja voidaanko ongelmat jollain tavalla ratkaista. Työssä arvioidaan myös, voiko esterioöljyeristeisen muuntajan rakentaa niin, että se täyttää kantaverkon muuntajille asetetut tekniset vaatimukset.

Projektissa tehdään myös toinen opinnäytetyö, jossa analysoidaan esterioöljyjen vaikutusta suurjännitemuuntajien tulipalo- ja öljyvuotoriskeihin, sekä tehdään ester- ja mineraaliöljymuuntajia vertaileva kustannus-hyötyanalyysi. Paloturvallisuus-, ympäristö ja taloudellisuusnäkökulmat on siis jätetty pääasiassa tämän työn tarkastelun ulkopuolelle. Projektissa selvitetään uuden esterioöljymuuntajan hankintaa, joten mineraaliöljymuuntajan uudelleentäyttämömahdollisuus esterioöljyllä on jätetty myös opinnäytetöiden aihepiirin ulkopuolelle.

Työn toisessa luvussa esitellään yleisesti Fingridin suurjännitemuuntajien rakenne ja toiminta. Kolmannessa luvussa kerrotaan muuntajien ikääntymisestä ja kunnossapidosta. Neljännessä luvussa kerrotaan eristysnesteiden sähköisistä ja fysikaalisista ominaisuuksista ja perinteisesti muuntajissa käytetyistä mineraaliöljyistä. Viidennessä luvussa esitellään markkinoilla olevien esterioöljyjen teknisiä ominaisuuksia ja vertaillaan niitä Fingridin nykyisissä uusimmissa suurjännitemuuntajissa käytettävään öljyyn. Kuudennessa luvussa pohditaan esterioöljyjen soveltuvuutta kantaverkon suurjännitemuuntajiin aiemmissa luvuissa esiteltyjen näkökulmien pohjalta.



## 2. SUOMEN KANTAVERKON SUURJÄNNITE-MUUNTAJAT

Sähkön siirrossa pyritään käyttämään mahdollisimman korkeita jännitteitä siirron aikana syntyvien häviöiden pienentämiseksi. Tehonsiirto eri jännitetasoissa yhden sähköjärjestelmän sisällä on mahdollista muuntajien ansiosta. [2] Tässä luvussa kerrotaan yleisesti Fingridin suurjännitemuuntajista, eritellään muuntajan eri osien eristysrakennetta ja kerrotaan, missä muuntajan lämpöhäviöt syntyvät ja miten muuntajan jäähtytys tapahtuu.

### 2.1 Fingridin suurjännitemuuntajat

Muuntajan aktiivinen osa koostuu rautasydäimestä sekä ensiö- ja toisiokäämistä. Ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta indusoi rautasydämeen magneettivuon, joka puolestaan indusoi toisiokäämiin jännitteen. Muuntajan muuntosuhde määräytyy käämien kierroslukujen perusteella ja sitä voidaan säätää erillisen käämikytkimen avulla. Kantaverkon muuntajissa on yleensä myös kolmas käämi eli tertiäärikäämitys, johon voidaan kytkeä reaktorit kompensoimaan 400 kV:n verkon loistehoa. Fingridin kaikki muuntajat ovat täysmuuntajia, joissa ensiö, toisio- ja tertiäärikäämit ovat omat erilliset, toisistaan galvaanisesti erotetut kääminsä. Vastaavasti säästömuuntajassa jokaisen vaiheen käämit ovat sydämen pylvään ympärillä peräkkäin ja ensiö- ja toisiokäämeillä on galvaaninen yhteys. Kantaverkossa käytetään nykyisin ainoastaan täysmuuntajia muun muassa siksi, että käämien galvaanisen yhteyden puuttuminen mahdollistaa pienemmät vikavirrat maasulkutilanteissa. [2] [3]

Muuntajat voidaan jakaa niiden rautasydämen ja käämityksen mukaan kahteen perustyyppiin: vaippa- ja sydänmuuntajaan. Vaippamuuntajassa rautasydän on käämien ympärillä, kun taas sydänmuuntajassa käämit on kierretty rautasydämen pylväiden ympärille. Sydänmuuntaja on maailmalla yleisemmin käytetty muuntajatyyppe [8]. Fingridin suurjännitemuuntajat ovat yleensä viisipylväisiä sydänmuuntajia, mutta myös kolmipylväistä rakennetta voidaan käyttää. Viisipylväinen sydänrakenne on kolmipylväistä matalampi. Kantaverkon muuntajien koko määräytyy ensisijaisesti nimellistehon ja verkon jännitetasojen mukaan, mutta muuntaja ei kuitenkaan voi fyysisiltä mitoiltaan olla suurempi tai painavampi, kuin mitä valmistusmaan ja Suomen rauta- ja maanteilla voidaan kuljettaa. Kolmipylväistä rakennetta matalamman viisipylväisen sydänrakenteen käyttö mahdollistaa muuntajan kuljetuksen Suomen rautateilla. [2]

Fingridin suurjännitemuuntajat ovat pääsääntöisesti kaikki rinnankäyttökelpoisia keskenään. Rinnankäyttökelpoisuus tarkoittaa sitä, että sähköasemalla sijaitsevat muuntajat voidaan kytkeä samoihin kiskoihin ylä- ja alajännitepuolelta. Rinnankäyttö onnistuu, jos

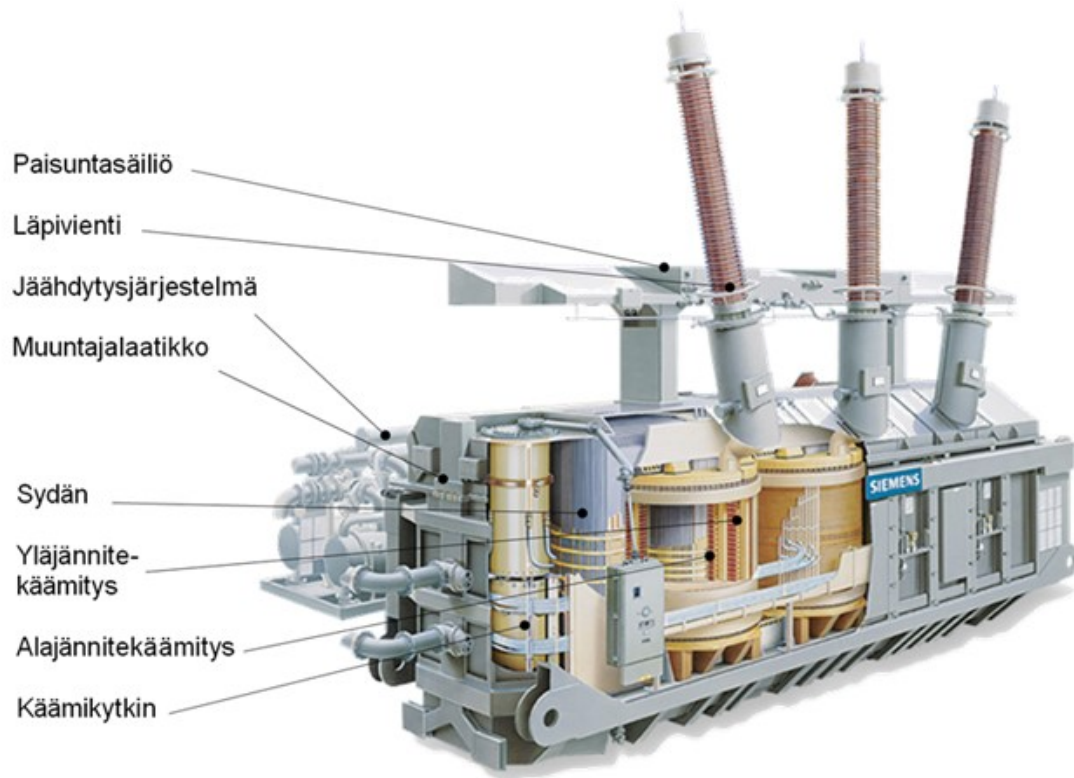
muuntajien oikosulkuimpedanssit, nimellistehot ja nimellisjännitteet ovat keskenään samaa suuruusluokkaa ja muuntajien kytkentäryhmät ovat samat. [2] Kuvassa 1 on esitetty yksi Fingridin Rauman sähköasemalla sijaitseva suurjännitemuuntaja.



*Kuva 1 Rauman sähköaseman 400/110/20 kV muuntaja.*

## 2.2 Suurjännitemuuntajan rakenne

Suurjännitemuuntaja koostuu muuntajalaatikosta, rautasydäimestä ja käämityksistä, eristysmateriaaleista, läpivienneistä, käämikytkimestä ja jäähdytysjärjestelmästä. Suurjännitemuuntajan rakenne on esitetty kuvassa 2.



*Kuva 2 Suurjännitemuuntajan rakenne [2].*

Tässä luvussa kerrotaan kuvassa 2 esitettyjen muuntajan tärkeimpien osien valmistusmateriaaleista ja rakenteesta. Luvussa kerrotaan myös muuntajan tärkeimmistä lisälaitteista.

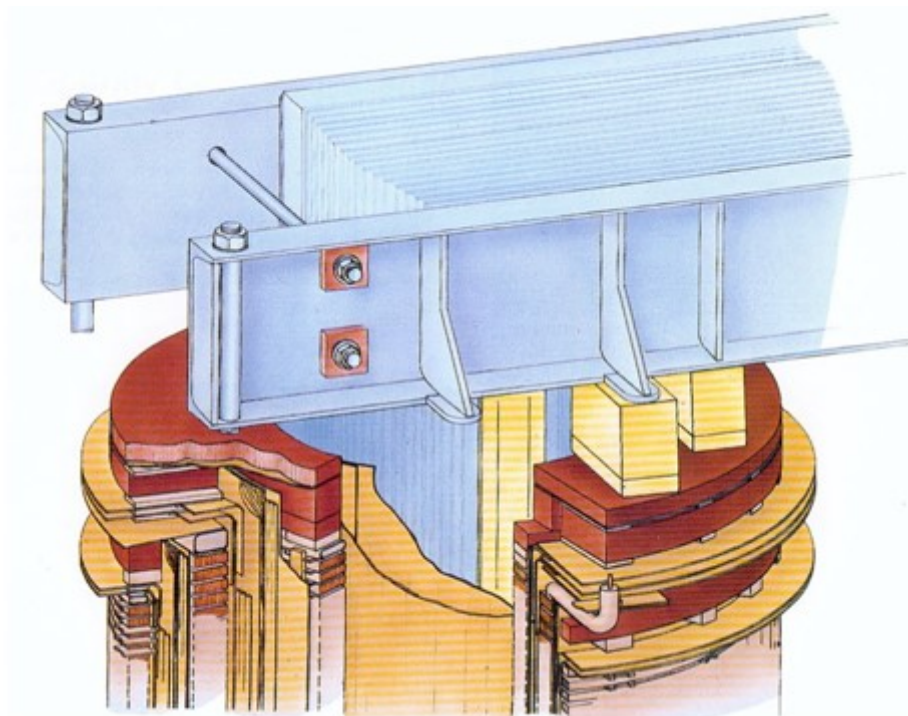
### 2.2.1 Rautasydän ja käämit

Muuntajan rautasydän valmistetaan kidesuunnatusta raudasta, josta on poistettu epäpuhtauksia, kuten hiiltä, ja johon on lisätty pieniä määriä piitä. Piin lisääminen kasvattaa raudan ominaisresistanssia. Muuntajasydän kootaan latomalla ohuita rautalevyjä päällekkäin. Sydän pyritään rakentamaan niin, että siihen indusoituva magneettivuo kulkisi mahdollisimman tarkkaan sydänmateriaalin kiteiden suuntaisesti. Tämä ei kuitenkaan ole täysin mahdollista kaikissa liitoskohdissa ja kulmissa, jolloin häviöt näissä paikoissa kasvavat. [9] Muuntajan häviöistä kerrotaan lisää luvussa 2.3.

Muuntajan käämit valmistetaan tavallisesti kuparista. Käämirakenteita on olemassa erilaisia. Fingridin muuntajissa käytetään nykyään yleensä nippukäämejä, joissa usea suoraakaitteen muotoinen, emaloitu johdin on liitetty yhdeksi ryhmäksi. Nipun johtimet vaihtavat paikkaa jatkuvasti niin, että jokainen johdin käy nipun jokaisessa kohdassa. Vuorottelu vähentää käämissä syntyviä häviöitä, koska virranjako osajohtimissa saadaan tasaiseksi. Nippujohtimien käyttö myös pienentää käämitysten ja siten koko muuntajan kokoa. [2] [10]

Rautasydän ja käämit eristetään toisistaan kiinteillä eristeillä, jotka koostuvat pääasiassa selluloosasta kraft-paperin tai prespaanin muodossa. Kraft-paperi on hyvät sähköiset ominaisuudet omaavaa voimapaperia ja prespaani paksua eristepaperia, joka valmistetaan puristamalla useita ohuita paperikerroksia yhteen. Paperin lisäksi käämien välissä ja yleisesti muuntajalaatikon sisällä käytetään eristysmateriaalina myös öljyä.

Saman vaiheen käämit ovat Fingridin muuntajissa samalla rautasydämen pylväällä niin, että alajännitekäämi on lähimpänä sydäntä, yläjännitekäämi keskellä ja tertiärikäämi ulimpana. Fingridin muuntajien käämirakenne poikkeaa tavallisesta käämirakenteesta, jossa matalajännitteisin käämi on lähimpänä rautasydäntä. Kuvassa 3 on esitetty tyypillisen muuntajan yhden rautasydämen pylvään ja käämitysten eristysrakenne.

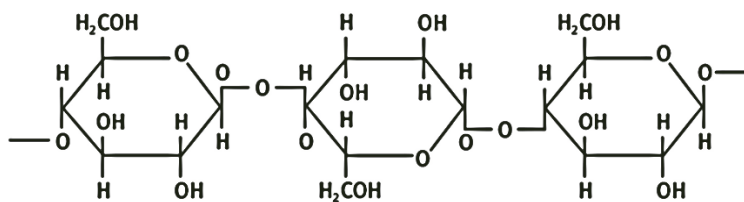


**Kuva 3** Käämi- ja eristysrakenne [11].

Kuvasta nähdään, että käämit on eristetty toisistaan ja sisin käämi rautasydäimestä prespaanilieriöiden avulla. Käämitysten välisessä prespaanissa on ohuita kanavia, joita pitkin öljy pääsee virtaamaan. Öljy toimii eristeen lisäksi muuntajan jäähdytysaineena. Prespaanin ja öljyn permittiviteettien suhde on noin 2:1, joten öljyyn kohdistuu vaihtovirralla noin kaksi kertaa prespaaniin kohdistuva sähköinen rasitus. Koska öljyn sähkölujuus huononee öljyvälän leveyden kasvaessa, prespaania tarvitaan muodostamaan seiniä, jotka rajaavat öljykanavat kapeammiksi. Hyvin suunniteltu öljyn ja selluloosaeristeen yhdistelmä on sähköisesti kestävämpi, kuin kumpikaan materiaaleista erikseen. [12]

Selluloosaa käytetään sen hyvien sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien sekä saatavuuden vuoksi. Selluloosasta poistetaan valmistuksessa ei-toivottuja ainesosia, kuten lig-

niini, hartsit ja erilaiset mineraalit. Myös valmistuksessa käytettyjen kemikaalien jäänökset ja muut epäpuhtaudet poistetaan valmiista paperista laajan puhdistusprosessin avulla. [13] [8] Esimerkki selluloosapolymeeristä on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4** Selluloosapolymeeri. Muokattu lähteestä [14].

Selluloosa on luonnollinen polymeeri, joka muodostuu kaavan  $(C_6H_{10}O_5)_n$  mukaan glukosimolekyylien ketjusta. Kaavassa  $n$  on kerroin, joka ilmaisee, monestako glukosimolekyylistä selluloosapolymeeri koostuu. Kerrointa kutsutaan yleisesti DP-luvuksi (Degree of Polymerisation) ja sitä mittaamalla voidaan seurata paperieristeen mekaanista kuntoa. Mitä korkeampi DP-luku on, sitä parempi vetolujuus paperilla on.

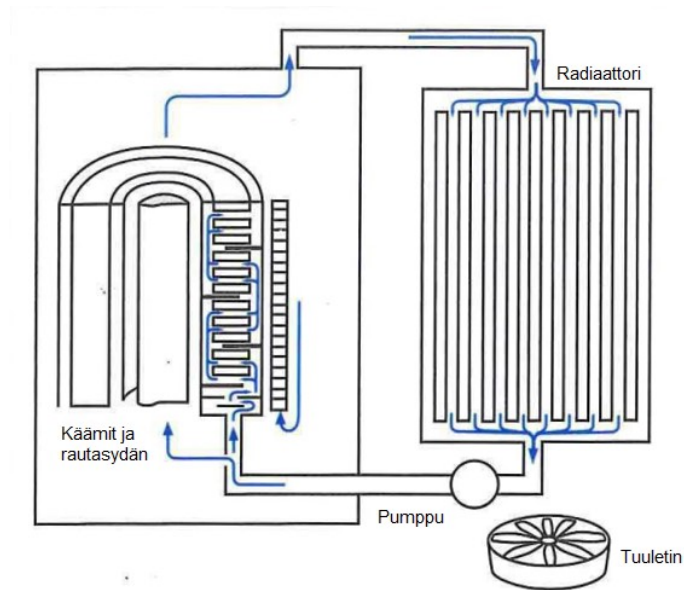
Uusimmissa Fingridin suurjännitemuuntajissa ei pääasiassa enää käytetä tavallista kraftpaperia, vaan termisesti paranneltua paperia. Kraft-paperin parantelu voidaan tehdä muokkaamalla selluloosaketjujen OH-ryhmiä syanoetyloimalla tai asetyloimalla tai lisäämällä selluloosaan kemikaaleja suojaamaan sitä hapettumiselta. Lisätyt kemikaalit ovat yleensä tyypiyhdisteitä kuten ureaa, melamiinia, disyaanidiamiinia tai polyakryyliamidia. [15]

Termisiltä ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan paras kiinteä eristysmateriaali muuntajakäyttöön on aromaattinen polyamidipolymeeri, joka tunnetaan paremmin kaupallisella nimellään Nomex® [16]. Nomex®:n käyttö suurjännitemuuntajissa on kuitenkin harvinaista sen eristepaperia huomattavasti kalliimman hinnan vuoksi. Nomex®:a on nykyisin käytössä lähinnä pienissä erikoismuuntajissa, joilta vaaditaan erityisen korkeaa lämmönkestoa. [3]

## 2.2.2 Jäähdytysjärjestelmä

Muuntajan häviöt nostavat lämpötilaa rautasydämessä ja käämeissä. Muuntaja tarvitsee jäähdytysjärjestelmän, jotta sen osat eivät ylikuumene ja rikkoudu häviöiden lämpövaikutuksesta. Tavallisissa jäähdytysjärjestelmissä muuntajan jäähdytysaineena toimivan öljyn päävirta kiertää käämien läpi muuntajan yläosaan joko itsestään konvektion tai pakotettuna pumppujen avulla. Öljy voi kulkea käämien läpi joko suoraan pystysuoria öljykanavia pitkin, tai mutkitellen vaakasuoria kanavia pitkin. Muuntajan yläosasta lämmentynyt öljy kiertää ulkopuolisen radiaattorin läpi takaisin muuntajaan. Yleensä öljyn jäähdyttämiseen käytetään muuntajan ulkopuolista ilmaa joko pelkästään tai tuulettimien avustamana. [13] Yksinkertaistettu muuntajan jäähdytysjärjestelmä on esitetty kuvassa 5.





**Kuva 5** Muuntajan ODAF-tyyppinen jäähdytysjärjestelmä [13].

Jäähdytysjärjestelmiä on olemassa eri tyyppisiä. ONAN (oil natural air natural) tarkoittaa järjestelmää, jossa jäähdytys perustuu öljyn ja ilman luonnolliseen kiertoon. ONAF-järjestelmässä (oil natural air forced) öljyn kierto järjestelmän sisällä tapahtuu ONAN-järjestelmän tapaan luonnollisesti konvektion avulla, mutta öljyn jäähdytystä radiaattorissa avustetaan tuulettimien avulla. OFAF-järjestelmässä (oil forced air forced) on tuulettimien lisäksi myös pumput, jotka avustavat öljyn kierrossa. ODAF-järjestelmässä (oil directed air forced) käytetään pumppuja ja tuulettimia ja öljy ohjataan kulkemaan käämien öljykanavien läpi. [17]

Fingridin muuntajissa on käytetty perinteisesti ONAN/ONAF-järjestelmää. Jäähdytysjärjestelmä toimii ilman tuulettimia noin 60 %:n kuormitusasteeseen asti. Uusissa muuntajissa voidaan käyttää ONAN/ONAF-, ONAN/OFAF- tai ONAN/ODAF-jäähdytysjärjestelmiä niin, että ne toimivat muuntajan 40 %:n kuormitusasteeseen asti ilman pumppuja ja tuulettimia. ONAN-jäähdytysjärjestelmä ei tarvitse toimiakseen omakäyttösähköä, jolloin muuntajan jäähdytys toimii myös mahdollisissa poikkeustilanteissa. Tämän vuoksi Fingridin järjestelmämuuntajissa ei hyväksytä puhtaita OFAF- tai ODAF-jäähdytystapoja. [2] [18]

Jäähdytysjärjestelmä mitoitetaan sen mukaan, ettei muuntaja missään vaiheessa pääse kuumenemaan liikaa. IEC:n muuntajien lämpötilan nousua käsittelevässä standardissa IEC 60076–2 käämien korkeimmaksi sallituksi lämpötilan nousuksi määritellään 65 K tai 70 K jos jäähdytysjärjestelmä on ODAF-tyyppiä. [19]

### 2.2.3 Muut osat

Kantaverkon suurjännitemuuntajat varustetaan aina käämikytkimellä, jonka avulla muuntajan muuntosuhdetta voidaan muuttaa katkottomasti. Käämikytkin koostuu tehokytkimestä, valitsimesta ja moottoriohjaimesta. Valitsin on kytketty säätökäämiin ja itse muuntosuhteen vaihto tapahtuu tehokytkimessä. Moottoriohjaimessa on sähkömoottori, jolla ensin ohjataan valitsinta ja sen jälkeen ladataan tehokytkimen jousiakku. Verkkomuuntajilla valitsimen askelmäärä vaihtelee  $\pm 6$  ja  $\pm 9$  välillä. Muuntosuhdetta vaihtaessa valitaan aina seuraava tai edellinen askel riippuen siitä, halutaanko muuntosuhdetta kasvattaa vai pienentää. Tämän jälkeen ladattu jousi suorittaa muuntosuhteen vaihdon tehokytkimessä. [20] [2]

Kantaverkon muuntajissa käämikytkin sijaitsee muuntajalaatikossa samassa öljyssä muun aktiiviosan kanssa. Tehokytkimessä on kuitenkin oma tiivis säiliönsä, jonka sisällä muuntosuhteen muutoksen toteuttavat koskettimet sijaitsevat. Tehokytkimen säiliössä oleva öljy ei pääse kosketuksiin muuntajalaatikon öljyn kanssa. Kun tehokytkimen liikkuva kosketin siirtyy kiinteältä koskettimelta toiselle, palaa säiliössä valokaari. Valokaari aiheuttaa öljyn nokeentumista ja vikakaasujen muodostumista. Tehokytkin sijaitsee omassa säiliössään, jotta nämä vikakaasut eivät pääsisi sekoittumaan muuhun muuntajajölyyn. Uusimmissa muuntajissa on siirrytty käyttämään käämikytkimiä, joissa tehokytkimen koskettimet ovat tyhjiöpullon sisällä, jolloin valokaaren aiheuttama vikakaasujen ja noen muodostuminen on käytännössä olematonta. Tehokytkimen eristys koostuu öljyn lisäksi kiinteistä osista, jotka voivat olla käämikytkimen rakenteesta riippuen esimerkiksi lasikuitua, epoksihartsia tai bakeliittia. Tehokytkin on varustettu virtausreleellä. Tehokytkimen vikatilanteissa valokaari saattaa jäädä palamaan sen säiliöön, jolloin öljy hajooa vikakaasuiksi ja säiliön paine nousee. Virtausrele havaitsee paineen noususta johtuvan öljyn virtauksen ja laukaisee muuntajan verkosta. [2]

Lämpölaajenemisesta johtuvan öljyn tilavuuden vaihtelun vuoksi muuntajassa tarvitaan paisuntasäiliö, johon öljy pääsee laajenemaan. Kantaverkon muuntajien paisuntasäiliön kapasiteetille on asetettu vaatimukset, joiden mukaan sen pitää kattaa seuraavat ääripään käyttötilanteet: muuntaja on kuormittamaton ulkolämpötilan ollessa  $-40\text{ °C}$  ja muuntajan hot spot –lämpötila on  $120\text{ °C}$  ulkolämpötilan ollessa  $40\text{ °C}$  [18]. Kun öljyn tilavuus pienenee sen lämpötilan laskiessa, tarvitaan säiliön ulkopuolelta ilmaa täyttämään tyhjäksi jäänyt tila. Paisuntasäiliöön voidaan liittää ilmankuivain, jonka tehtävä on kuivata ulkoa virtaava ilma, jotta sen kosteus ei pääse imeytymään öljyyn ja sitä kautta muuntajan perieristeisiin. Ilmankuivaimen sisällä on silikageeliä, joka imee ilman kosteuden itseensä. Paisuntasäiliö voi olla myös varustettu kumipussilla, joka eristää öljyn paisuntasäiliöön virtaavasta kosteudesta sisältävästä ilmasta. Kumipussimuuntajassakin tarvitaan kuitenkin ilmankuivain, sillä kosteus voi aiheuttaa kumipussin ennenaikaisen vikaantumisen. Yksi vaihtoehto muuntajan kuivana säilyttämiseen on myös paisuntasäiliön täyt-

täminen kuivalla typellä. Kun öljyn tilavuus pienenee, säiliöön virtaa lisää typpeä paineventtiilin läpi erillisestä kaasusylinteristä. Kun taas öljyn tilavuus kasvaa, tyyppi purkautuu säiliön ulkopuoliseen ilmaan. Tämä menetelmä pitää muuntajan hyvin kuivana, mutta lisää huoltotarvetta. Paisuntasäiliöt on yleensä varustettu lisäksi öljyn pinnan korkeuden osoittavilla mittareilla. [2]

Pisuntasäiliön ja muuntajalaatikon välisessä putkessa on Buchholz-rele eli kaasurele. Buchholz-rele on muuntajan suojalaite, joka kerää muuntajassa erilaisten ylikuumentumisvikojen myötä syntyneitä kaasuja. Kaasut muodostuvat öljyn molekyylilien hajotessa vikojen lämpövaikutuksesta. Releen toiminta on kaksiporrasista, sen ylempi porras suorittaa hälytyksen ja alempi porras laukaisun. Rele toimii, jos kaasua kertyy liikaa tai öljyn pinta putoaa releen alapuolelle. Kaasureleen lisäksi muuntaja voidaan varustaa erillisellä vikakaasuanalysaattorilla, joka analysoi eri kaasujen pitoisuuksia. [2]

Öljyn hajoaminen kaasuiksi voi aiheuttaa muuntajalaatikon sisällä ylipainetta. Ylipaineen seurauksena muuntajalaatikko voi repeytyä ja öljy vuotaa ulos. Muuntajalaatikko ja teho-kytkin onkin varustettu ylipaineventtiileillä, joiden tarkoitus on rajoittaa vikatilanteissa syntyvää ylipainetta. [2]

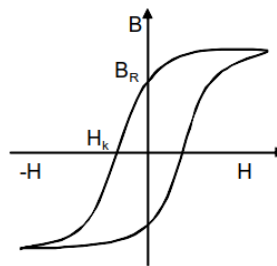
Koska muuntajalaatikko on maan potentiaalissa, tarvitaan käämien liittämiseksi kytkinlaitokseen erillisiä läpivientieristimiä. Läpivientieristimissä on perinteisesti posliininen eristin, jonka sisällä on kondensaattorirakenteinen pääeristys. Pääeristyksen sisällä kulkee virtatie läpiviennin päissä olevien virtaliittimien välillä. Läpivientieristimen pääeristyksen ja posliinieristyksen välissä on lisäksi öljyä. Uusimmissa muuntajissa käytetään kuivaeristeisiä läpivientejä, joissa ulkoisena eristinmateriaalina on silikonikumia ja sisäinen kondensaattorirakenteen eristysmateriaalina hartsia. Kuivaeristeisessä läpiviennissä ei nimensä mukaisesti käytetä öljyä. Kuivaeristeiset läpiviennit parantavat työturvallisuutta asemilla, sillä perinteisten läpivientien posliini voi räjähtää vian seurauksena. Posliini voi räjähtäessään myös rikkoutua muuntajan sisäpuolelle, jolloin koko muuntajan vaurioituminen läpiviennin vian seurauksena on mahdollista. [2]

## 2.3 Muuntajan häviöt

Vaikka muuntajien hyötysuhde on sähkökoneiden korkeimpia, yleensä yli 95 %, on niissä tapahtuvat häviöt otettava huomioon muuntajaa suunnitellessa. Muuntajan häviöt voidaan jakaa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Tyhjäkäyntihäviöt tapahtuvat pääasiassa muuntajan rautasydämessä, minkä perusteella niitä kutsutaan myös muuntajan rautahäviöiksi. Tyhjäkäyntihäviöt muodostuvat viidestä osasta: hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä rautasydämessä, magnetointivirran aiheuttamista pätötehohäviöistä, hajanaisista pyörrevirtahäviöistä sydämen pulteissa ja kiinnikkeissä sekä eristeessä tapahtuvista häviöistä. Hystereesi- ja pyörrevirtahäviöt muodostavat noin 99 % tyhjäkäyntihäviöistä, joten muut häviöt voidaan yleensä jättää huomiotta. [21]



Muuntajan sydämessä käytetty rauta on ferromagneettinen aine, eli sen kiderakenteeseen muodostuu magnetoituneita alueita. Tällaisia alueita kutsutaan Weissin alueiksi. Ilman ulkoisen magneettikentän vaikutusta Weissin alueiden magneettiset momentit ovat suuntautuneet satunnaisesti ja kompensoivat toisensa, eikä aineessa näennäisesti vaikuta magneettikenttää. Kun ferromagneettiseen aineeseen vaikuttaa ulkoinen magneettikenttä, alkavat Weissin alueiden magneettiset momentit kääntyä magneettikentän suuntaan ja magneettivuontiheys kasvaa. Kun kaikkien alueiden momentit ovat kääntyneet samaan suuntaan, ei ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvattaminen enää voi lisätä materiaalin magnetoitumista. Kun ferromagneettiseen materiaaliin vaikuttava magneettikenttä on sinimuotoinen, voi materiaalissa vaikuttava magneettikenttä olla samalla ulkoisella magneettikentänvoimakkuudella eri suuruinen riippuen siitä, onko ulkoisen kentän voimakkuus kasvamassa vai pienenemässä. Ulkoisen magneettikentän suunnan muuttuessa Weissin alueiden magneettiset momentit kääntyvät magneettikentän mukana viiveellä. Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. [9] Magneettivuontiheyden muutosta ulkoisen magneettikentän voimakkuuden mukaan kuvaava hystereesisilmukka on esitetty kuvassa 6.

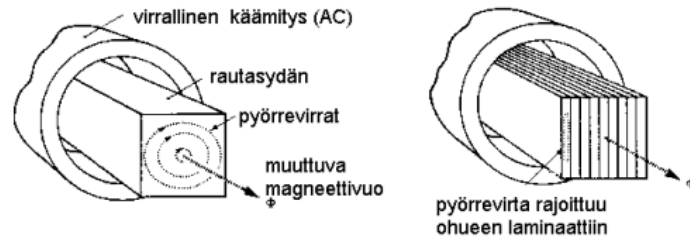


**Kuva 6** Hystereesisilmukka [9].

Kuvassa  $B$  tarkoittaa materiaaliin vaikuttavan magneettivuon tiheyttä ja  $H$  ulkoisen magneettikentän voimakkuutta. Sinimuotoisesti vaihtelevan magneettikentän vaikutuksesta Weissin alueiden magneettiset momentit kääntyilevät jatkuvasti. Kääntyilystä johtuva molekyyli-tason kitka kuluttaa energiaa, mikä ilmenee rautasydämessä lämpönä. Tätä lämpöä kutsutaan hystereesihäviöksi. [22]

Hystereesihäviöt ovat suoraan verrannollisia taajuuteen. Hystereesihäviöt riippuvat myös hystereesisilmukan alueesta, joka on materiaalikohtainen ja riippuu magneettivuontiheyden maksimiarvosta. Hystereesihäviöitä pyritäänkin rajoittamaan pienentämällä hystereesisilmukan alaa. Hystereesisilmukan alaa saadaan pienennettyä esimerkiksi kylmävalsaamalla muuntajasydämen rautaseos niin, että raudan kuutionmuotoiset kiteet järjestyvät mahdollisimman yhdensuuntaisiksi. [8] [9]

Pyörrevirtahäviöt syntyvät, kun käämien sinimuotoinen virta indusoi rautasydämeen sinimuotoisesti vaihtelevan magneettivuon. Vaihteleva magneettivuo taas indusoi rautasydämen koko pituudelle pyörrevirtoja. Pyörrevirtojen johdosta rauta alkaa lämmetä. Pyörrevirtojen kulku on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7** Pyörrevirrat muuntajan rautasydämessä [9].

Lämpöhäviöiden pienentämiseksi pyörrevirtojen kulkua pyritään rajoittamaan. Kuten kuvasta 7 nähdään, pyörrevirtoja voidaan rajoittaa kokoamalla rautasydän ohuista laminoituista levyistä. Häviöitä pyritään minimoimaan myös kasvattamalla sydämen resistiivisyyttä. Pyörrevirtahäviöt ovat suoraan verrannolliset taajuuden neliöön. [8] [9]

Kuormitushäviöt syntyvät pääasiassa muuntajan käämeissä ja ovat riippuvaisia muuntajan kuormasta. Kuormitushäviöt koostuvat johtimen resistiivisyydestä johtuvista häviöistä sekä johtimissa, muuntajasäiliössä ja teräsrakenteissa esiintyvistä pyörrevirtahäviöistä. Johtimen resistanssi ja pätötehohäviöt ovat suoraan verrannollisia johtimen pituuteen ja kääntäen verrannollisia sen poikkipinta-alaan. Resisttiivisiä häviöitä voidaan siis rajoittaa vähentämällä käämin kierrosmäärää ja suurentamalla käämin poikkipinta-alaa. Käämin kierrosmäärän vähentäminen vaatii kuitenkin suuremman magneettivuon, joka taas vaatii suuremman rautasydämen ja lisää rautahäviöitä.

Pyörrevirrat syntyvät johtimiin hajavuon seurauksena. Pyörrevirtoja voidaan rajoittaa nostamalla niiden reittien resistiivisyyttä, mikä saadaan aikaan pienentämällä johtimen poikkipinta-alaa tai jakamalla johdin ohuisiin, toisistaan eristettyihin säikeisiin. Toisaalta johtimen poikkipinta-alan pienentäminen lisää käämien pätötehohäviöitä ja eristyskerrosten lisääminen käämisäikeiden väleihin kasvattaa muuntajan aktiiviosan ja siten koko muuntajan kokoa. Lisäksi usean johtimen rinnankytkentä on kallista toteuttaa. Muuntajan käämimateriaalina käytetään yleensä korkean johtavuuden kuparia, joka on todettu hintansa ja saatavuutensa puolesta kannattavimmaksi materiaaliksi. Kuormitushäviöitä voidaan kutsua tyypillisen johdinmateriaalin mukaan myös kuparihäviöiksi. [21] [8] [9]

## 3. SUURJÄNNITEMUUNTAJAN ELINKAAREN HALLINTA

Suurjännitemuuntaja on kallis ja tärkeä verkon osa, minkä vuoksi sen huolellinen kunnossapito on erityisen tärkeää. Tässä luvussa eritellään muuntajan ikääntymiseen ja vikaantumiseen vaikuttavia tärkeimpiä syitä ja kerrotaan Fingridin suurjännitemuuntajien kunnossapidosta.

### 3.1 Muuntajan ikääntyminen

Eristysmateriaalien ikääntyminen on muuntajan elinikään merkittävästi vaikuttava tekijä. Eristyksen ikääntymiseen vaikuttaa ajan lisäksi erityisesti kosteus, lämpö ja happi. Koska lämpötila muuntajan sisällä on jakaantunut epätasaisesti, tarkastellaan eristyksen ikääntymistä muuntajan korkeimman lämpötilan mukaan. [23]

Muuntajan elinikä määräytyy pääasiassa sen kiinteän eristeen mekaanisen kunnon perusteella. Paperieristeen kunto vaikuttaa muuntajan käämien kiristyspaineeseen. Paperin hajoaminen aiheuttaa käämien kutistumista ja löystymistä, mutta toisaalta paperin kosteuspitoisuuden nouseminen turvottaa eristeen kokoa ja käämien aksiaalinen pituus kasvaa. Epämuodostunut eristys ja löysät käämit voivat vaurioitua suurten oikosulkuvirtojen vaikutuksesta. [12]

Koska selluloosa on orgaaninen aine, se hajoaa. Selluloosan hajoaminen ilmenee glukosiketjujen katkeamisena, jolloin paperin DP-luku pienenee. Hajoamistuotteina syntyy lisäksi vettä, furfuraalia ja kaasuja, esimerkiksi hiilimonoksidia. Vaikka selluloosan molekyyliketjut eivät hajoa tasaisesti, voidaan koko aineen DP-luku edelleen ilmaista jäljelle jäävien ketjujen pituuksien keskiarvona. Uuden kraft-paperin DP-luku on noin 1000–1500. Jos DP-luku on alle 200, on paperi menettänyt lähes kaiken vetolujuutensa ja tullut niin hauraaksi, että sitä on vaikea käsitellä sen hajoamatta. Tällöin sen katsotaan olevan elinkaarensa päässä. Paperieristeestä on huomattavan vaikeaa saada otettua tutkittava näyte, sillä hot spot –lämpötilat ja siten huonokuntoisin eristemateriaali löytyvät yleensä käämitysten välistä. Tämän vuoksi DP-luku mitataan harvoin ja paperin kuntoa seurataan pääasiassa öljyyn liuenneiden furfuraalien ja muiden hajoamistuotteiden avulla. Käytöstä poistuneesta muuntajasta voidaan kuitenkin ottaa näytteet DP-luvun mittaamista varten ja tulosten avulla voidaan arvioida samanlaisten vielä käytössä olevien muuntajien kuntoa. [12] [17] [23]

Muuntajan korkeat lämpötilat aiheuttavat selluloosan molekyylirakenteessa hajoamisreaktioita [17]. Molekyyleissä tapahtuu lämpövärähtelyä kaikissa lämpötiloissa. Värähtely-

taajuus on suoraan verrannollinen molekyylin lämpötilaan. Kun värähtely kiihtyy lämpötilan noustessa, venyvät molekyylit niin paljon, että ne saattavat hajota pienemmiksi molekyyleiksi. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan pyrolyysiksi. [24]

Lämmön lisäksi myös kosteus nopeuttaa paperieristeen ikääntymistä. Paperi imee itseensä herkästi vettä. Koska erilaisten epäpuhtauksien liukoisuus veteen on korkea, kiihdyttää kosteus paperin hajoamista ja näin huonontaa eristeen kuntoa. Eräs selluloosan hajoamistuotteista on vesi, joten hajoamisreaktio itsessään kiihdyttää reaktionopeutta. Muuntajan valmistusvaiheessa onkin tärkeää kuivata paperieriste huolellisesti ja pitää se käytön aikana mahdollisimman kuivana. [17] Uusi eristyspaperi sisältää alle 0,5 % painostaan vettä. Käytössä olevan hyvin huolletun muuntajan eristyspaperi sisältää 0,5–1,5 % kosteutta. Tällöin eristys voidaan ajatella vielä kuivaksi. Jos paperin kosteuspitoisuus nousee yli 4 %:iin, eristysrakenteen hajoaminen on todennäköistä. Muuntajan öljy suojaa paperieristettä kosteudelta. Mitä enemmän öljyyn liukenee vettä, sitä vähemmän sitä pääsee kulkeutumaan paperieristeeseen. Tärkeintä paperin kuivana pysymisen kannalta on huolehtia muuntajan tiivisteiden kunnosta, jotta ilmankosteus ei pääse muuntajan sisään. [23]

Myös happi nopeuttaa muuntajan eristyksen vanhenemista. Happi pahentaa kosteuden vaikutusta kiinteän eristeen hajoamiseen ja nopeuttaa myös öljyn hapettumisreaktiota, kuten luvussa 3.2 todettiin. Hapen vaikutuksen minimoimiseksi muuntajaöljyihin lisätään usein hapettumisenestoaineita. Muuntajat voidaan myös rakentaa hermeettisesti suljetuiksi, jolloin happi ei pääse kosketuksiin eristysmateriaalien kanssa. Muuntajan paisuntasäiliö on lisäksi mahdollista varustaa ilmalla täytetyllä kumipussilla, joka täyttää paisuntasäiliöstä öljyn yläpuolisen tilan. Kumipussin sisus on yhdistetty muuntajan ulkopuolelle, jolloin öljyn tilavuuden muuttuessa myös pussin tilavuus pääsee muuttumaan. Kumipussin käyttö estää öljyn pääsemistä kosketuksiin ilman kanssa. [8] [23]

## 3.2 Kunnossapito

Fingridin suurjännitemuuntajien kunnossapidossa noudatetaan pääasiassa aina samaa aikataulua. Muuntajien kunnonhallinnan tavoitteena on saavuttaa niille noin 60 vuoden elinikä. Muuntajat tarkastetaan päällisin puolin useasti vuodessa asematarkastusten yhteydessä. Tarkastuksessa muun muassa luetaan muuntajan mittarien arvot, paikannetaan mahdolliset öljyvuodot ja varmistetaan, että muuntajan osat ovat ehjiä. Muuntajat lämpökuvataan muun aseman lämpökuvauksen yhteydessä noin kerran vuodessa. Lämpökuvauksessa tarkkaillaan esimerkiksi läpivientieristimiä ja muuntajan tertiäärikiskotusta. Tarkastus ja lämpökuvaus suoritetaan muuntajan ollessa käytössä. [25]

Suurjännitemuuntajista otetaan vuoden välein öljynäyte. Öljynäytteen ottaminen ei vaadi käyttökeskeytystä. Käytännössä kaikki kantaverkon muuntajat on varustettu jatkuvatoimisilla vikakaasuanalysaattoreilla. Mikäli muuntajassa ei tällaista kuitenkaan ole, otetaan

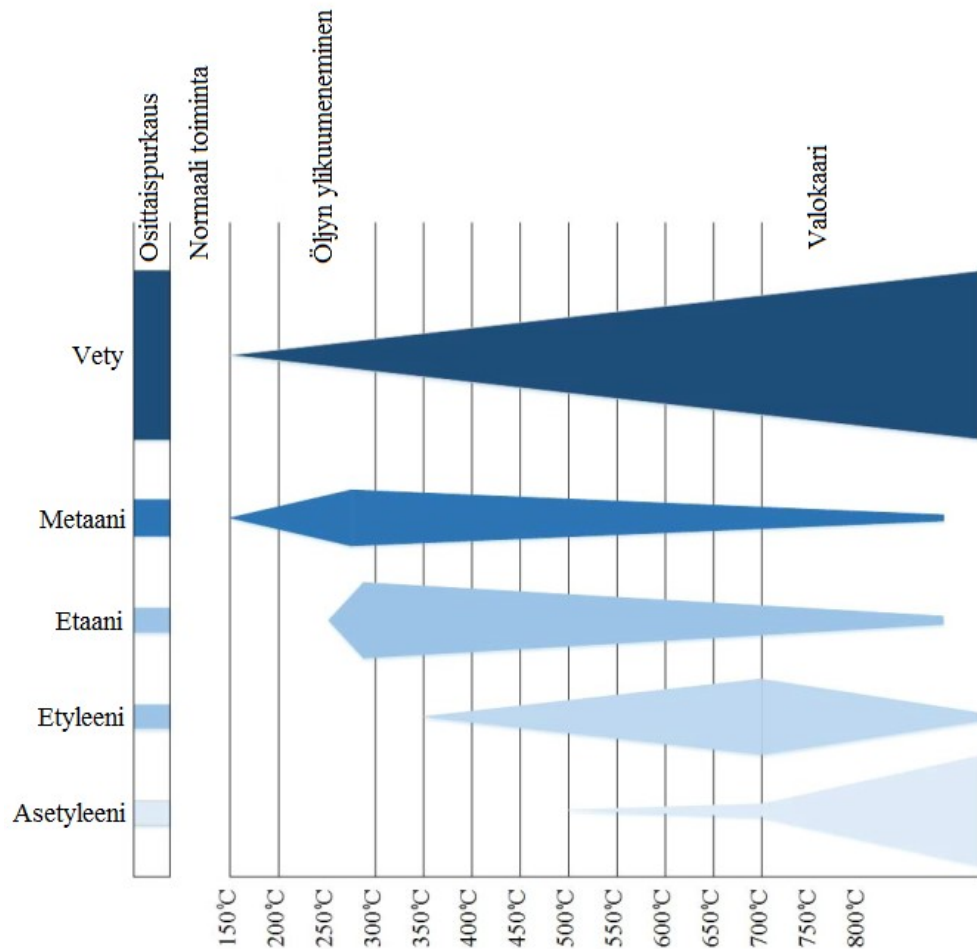
öljynäyte puolen vuoden välein. Öljynäyte voidaan analysoida joko sähköasemalla kannettavalla analysaattorilla tai se voidaan lähettää tutkittavaksi Fingridin sopimuslaboratorioon. Vuosittain otettavasta öljynäytteestä mitataan sen sähkölujuus ja tehdään sille kaasuanalyysi. Vuosittain tehtävien analyysien lisäksi öljystä mitataan viiden vuoden välein myös häviökerroin, kiinteiden aineiden määrä, rajapintajännitys, inhibiittoripitoisuus, furfuraalit ja happoluku. Öljyn mitattavista ominaisuuksista kerrotaan lisää luvussa 4. [25]

Osa muuntajan kunnossapidon toimenpiteistä vaatii muuntajan käyttökeskeytyksen. Suurjännitemuuntajan mittaushuolto suoritetaan noin kolmen vuoden välein ja se sisältää muuntajan tarkastuksen, muuntajasuojien koestuksen ja käämikytkimen ohjaimen kunnon tarkistuksen. Koko käämikytkin huolletaan yhdeksän vuoden välein. Muuntajan häviökerroinmittaus suoritetaan myös yhdeksän vuoden välein. Häviökertoimen arvon perusteella voidaan arvioida, onko muuntaja vielä hyvässä kunnossa, vai tarvitseeko sen tarkkailua mahdollisesti tihentää vanhenemisen myötä. Suurjännitemuuntajat perushuolletaan kerran 30–40 vuoden ikäisenä tai muuntajan vikaantuessa merkittävästi. Perushuollossa muuntajan eristys kuivataan ja sen käämit kiristetään oikosulkulujuuden palauttamiseksi. Lisäksi muuntajan tiivisteet vaihdetaan ja läpiviennit viedään laboratorioon tutkittaviksi. Huollossa tarkastetaan ja korjataan myös muita muuntajan käytön kannalta tärkeitä osia. [25]

### 3.3 Liuenneiden kaasujen analyysi

Muuntajan eristysmateriaalin kuluessa siinä syntyy kemiallisten reaktioiden tuloksena erilaisia kaasuja, jotka liukenevat muuntajaöljyyn. Muuntajan kunnon tärkein valvontakeino on näiden kaasujen analysointi. Liuenneiden kaasujen analyysiin on olemassa useita erilaisia perinteisiä ja laskennallisia menetelmiä. Perinteiset menetelmät perustuvat öljyyn liuenneiden vikakaasujen määrän selvittämiseen.

Eri tyyppisistä vioista muodostuu öljyyn tietty määrä erilaisia kaasuja. Vioissa purkautuva energia hajottaa öljyn hiili-vety ja hiili-hiili –sidoksia, jolloin hajonneet molekyylit muodostavat uusia kaasuyhdistelmiä. Vikatyyppit, jotka muuntajasta voidaan liuenneiden kaasujen analyysillä havaita ovat ylikuumeneminen, osittaispurkaukset ja valokaaret. Valokaari voi syntyä esimerkiksi läpiviennin ja muuntajalaatikon välisen oikosulun tai käämitysten kierrossulun vuoksi. Osittaispurkauksia taas syntyy eristysmateriaalin pettäessä paikallisesti. Lisäksi muuntajan normaalitilassa voi tapahtua hajanaista kaasunmuodostumista ilman varsinaisia vikatilanteita. [26] [27] Öljyyn muodostuvien vikakaasujen suhteellinen määrä eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8** Öljyyn muodostuvien kaasujen suhteellinen määrä eri lämpötiloissa [26].

Kuvan mukaisesti vikojen myötä öljyyn liukenee vetyä ( $H_2$ ), metaania ( $CH_4$ ), asetyleeniä ( $C_2H_2$ ), etyleeniä ( $C_2H_4$ ) ja etaania ( $C_2H_6$ ). Paperieristeen hajoamistuotteina öljyyn liukenee myös hiilimonoksidia (CO) ja hiilidioksidia ( $CO_2$ ).

Kuvasta 12 nähdään, että tietyissä vioissa muodostuvat kaasut eivät ole yksiselitteiset. Myös vioille epäominaisia kaasuja voi syntyä pieniä määriä. Esimerkiksi vetyä ja metaania voi syntyä vikatilanteiden lisäksi myös normaaleissa muuntajan käyttölämpötiloissa. Tämän vuoksi liuenneiden kaasujen analyysi ei aina ole täysin luotettava keino vikojen tunnistamiseen.

Taulukkoon 1 on koottu liuenneiden kaasujen analyysissä eri vikatilanteisiin yhdistettävät kaasut.

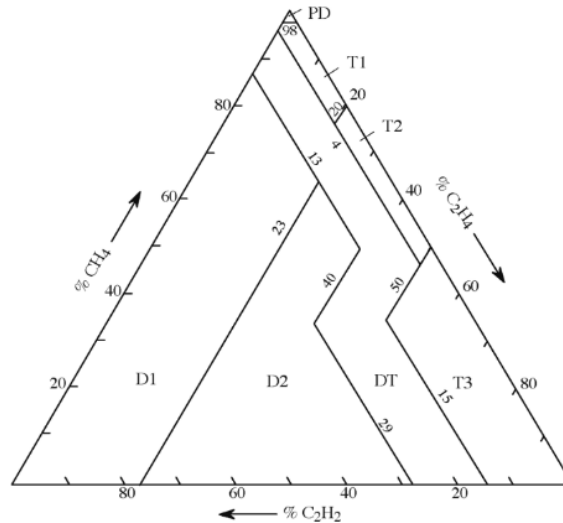
**Taulukko 1 Kaasujen muodostuminen eri vioissa [17].**

Vian tyyppi	Muodostuva kaasu	
Normaali ikääntyminen	H <sub>2</sub>	Vety
	CH <sub>4</sub>	Metaani
	CO	Hiilimonoksidi
	CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
Öljyn ylikuumentuminen	CH <sub>4</sub>	Metaani
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etaani
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etyleeni
Osittaispurkaukset	H <sub>2</sub>	Vety
Valokaaret	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Asetyleeni
Selluloosan hajoaminen	CO	Hiilimonoksidi
	CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi

Liuenneiden kaasujen analyysi voidaan jakaa kahteen osaan: testiin, jolla mitataan öljyyn liuenneiden kaasujen määrä, sekä analysointimenetelmään, jolla kaasujen perusteella saadaan selvitettyä muuntajassa tapahtuneen vian tyyppi.

Standardissa IEC 60567 määritellään kolme eri tyyppistä kaasujen erottelumenetelmää: alipainemenetelmä, liuotusmenetelmä ja headspace-menetelmä. Alipainemenetelmiä on kaksi erilaista. Monisyklisessä Toepler-pumppumenetelmässä öljystä koitetaan erotella mahdollisimman suuri osuus siihen liuenneista kaasuista alistamalla öljy alipaineelle usean kerran. Toepler-menetelmästä poiketen osittaisessa kaasunpoistomenetelmässä öljy altistetaan alipaineelle vain kerran. Menetelmän tehokkuus on riippuvainen öljyn tyypistä ja kaasujen liukenevuudesta, kun taas Toepler-menetelmässä näillä ei ole merkitystä. Puutteellista kaasujen erottelua voidaan korjata laskennallisesti erilaisten kaasujen liukenemiskertoimien avulla. Liuotusmenetelmässä kaasujen erottelu tapahtuu erillisen öljyn läpi kuplivan kantajakaasun avulla. Menetelmän tarkkuus katsotaan riittäväksi, eikä liukenemiskertoimia tarvita. Headspace-menetelmässä pieni määrä öljyä asetetaan kosketuksiin jalokaasun kanssa, jolloin osa öljyyn liuenneista kaasuista siirtyy kaasufaasiin. Headspace-menetelmässä kaasujen kokonaismäärää on arvioitava laskennallisesti vakioiden avulla. [28] [27]

Yleisimmät kaasujen analysointitavat ovat Duvalin kolmiot, kaasujen suhteita tutkivat menetelmät ja avainkaasumenetelmä. Duvalin kolmio on graafinen analysointimenetelmä. Kolmion jokaisella sivulla on tietyn kaasun suhteellinen määrä öljyssä ja kolmion sisus on jaettu eri vikatyyppejä kuvaaviin alueisiin. Duvalin kolmiossa tutkittavat kaasut ovat etyleeni, asetyleeni ja metaani. Klassinen Duvalin kolmio mineraaliöljymuuntajan vikojen selvittämiseksi on esitetty kuvassa 9. Kolmioita on olemassa myös käämikytkimen vikojen, alhaisten lämpötilojen vikojen ja vaihtoehtosilla öljyillä täytettyjen muuntajien vikojen analysoimiseksi. Eri kolmioissa eri vika-alueiden rajat on määritelty vastaamaan tyypillisiä vioissa syntyviä kaasumääriä. [29]



**Kuva 9** Klassinen Duvalin kolmio [29].

Kuvassa eri alueiden sisällä olevat lyhenteet kuvaavat vikatyyppejä, joka muuntajassa on tapahtunut, mikäli kaasumäärät osuvat kyseisen alueen rajojen sisään. Vikatyyppejä kuvaavien lyhenteiden selitykset on koottu taulukkoon 2.

**Taulukko 2** Duvalin kolmion vika-alueiden lyhenteiden selitykset [29].

PD	Osittaispurkaukset
D1	Pienienergiset purkaukset
D2	Suurienergiset purkaukset
T1	Lämpövauriot, $T < 300\text{ °C}$
T2	Lämpövauriot, $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$
T3	Lämpövauriot, $T > 700\text{ °C}$
DT	Sähköisten ja lämpövaurioiden yhdistelmät

Kaasujen suhteita tutkivia menetelmiä on olemassa kolme erilaista: Rogersin menetelmä, Dornenburgin menetelmä ja IEC 60599 –menetelmä. IEC 60599 on näistä yleisimmin käytetty. IEC 60599 tutkittavat kaasusuhteet ovat  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  ja  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ . Kaasujen suhdelukujen perusteella saadaan selvitettyä, millainen vika muuntajassa on tapahtunut. IEC 60599 –menetelmän vikatyypit ovat samat kuin Duvalin kolmiolle taulukossa 8 esitellyt vikatyypit pois lukien DT-tyyppiset viat.

Avainkaasumenetelmä on yksinkertainen keino analysoida öljyyn liuenneita kaasuja. Avainkaasumenetelmässä tutkitaan liuenneiden kaasujen suhteellisia määriä ja tunnistetaan niistä eri vikatyypeissä muodostuvat hallitsevat kaasut. Menetelmässä asetyleeni ja vety yhdistetään valokaareen, vety osittaispurkauksiin, hiilimonoksidi selluloosan hajoomiseen ja etyleeni öljyn ylikuumenemiseen. Koska menetelmässä tutkitaan vain jokaisen vian hallitsevat kaasut, on menetelmä muita epätarkempi. [27]



## 4. ERISTYSNESTEET

Muuntajan eristysneste toimii sähköisen eristeen lisäksi myös muuntajan jäähdytysaineena. Jotta öljyjen soveltuvuus muuntajakäyttöön voidaan taata, on olemassa standardeja, jotka määrittelevät tietyt raja-arvot öljyjen sähköisille ja fysikaalisille ominaisuuksille. Fingridissä käytössä olevat muuntajamäärittelyt perustuvat IEC:n (International Electrotechnical Commission) standardeihin. IEC on voittoa tavoittelematon organisaatio, joka valmistelee ja julkaisee kansainvälisiä standardeja sähkötekniikkaan liittyen.

IEC on julkaissut erilliset standardit eri öljytyypeille. Standardi IEC 60296 käsittelee mineraaliöljyä, IEC 61099 käsittelee synteettisiä estereitä ja IEC 62770 käsittelee luonnollisia estereitä. Tässä luvussa eritellään tarkemmin joitain eristysnesteiden sähköisiä ja fysikaalisia ominaisuuksia, joille standardit asettavat vaatimuksia.

### 4.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Muuntajan öljy toimii sähköisen eristeen lisäksi myös jäähdytysaineena. Jotta eristysnesteen virtaaminen jäähdytysjärjestelmän läpi onnistuisi, tarvitsee se riittävän hyvät lämpöominaisuudet. Nesteen virtausnopeus muuntajan jäähdytysjärjestelmässä määräytyy yhtälön

$$w = f \cdot \frac{T_2 - T_1}{\nu}$$

mukaan. Yhtälössä  $w$  tarkoittaa nesteen virtausnopeutta,  $f$  on laskennallinen vakio,  $\nu$  on nesteen kinemaattinen viskositeetti,  $T_2$  on nesteen korkein lämpötila ja  $T_1$  on nesteen matalin lämpötila. Yhtälöstä huomataan, että nesteen virtausnopeus on kääntäen verrannollinen sen viskositeettiin. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä pienempi viskositeetti nesteellä on, sitä paremmin se kykenee virtaamaan jäähdytysjärjestelmän läpi ja on siis parempi käytettäväksi muuntajan jäähdytysaineena.

Viskositeetti kuvaa nesteen sisäistä kykyä vastustaa virtaamista. Viskositeetti kasvaa lämpötilan laskiessa niin kauan, kunnes aine saavuttaa jähmettymispisteensä. Etenkin kylmillä alueilla on tärkeää valita eristysneste niin, että sen viskositeetti ja jähmettymispiste ovat tarpeeksi alhaiset. Eristysnesteen viskositeetti vaikuttaa tarvittavan jäähdytysjärjestelmän kokoon, sillä järjestelmän osien on oltava tarpeeksi leveät, jotta neste pystyy virtaamaan niissä vapaasti. Pieni viskositeetti siis mahdollistaa kapeammat öljykanavat paperieristeeseen. Öljykanavien koko vaikuttaa myös eristeen läpilyöntilujuuteen ja muuntajan impedansseihin. Kinemaattista viskositeettia kuvataan yksiköllä  $\text{mm}^2/\text{s}$ . [13] [8]

Muuntajassa käytettävät eristysnesteet ovat palavia aineita. Koska muuntajissa esiintyy korkeita lämpötiloja, on tärkeää, että eristysnesteiden leimahduspiste on riittävän korkea. Leimahduspiste kertoo alimman mahdollisen lämpötilan, jossa nesteen pinnalle muodostuu tarpeeksi kaasua muodostamaan ilman kanssa palavan seoksen. Syttymispiste taas tarkoittaa alinta lämpötilaa, jossa neste syttyy palamaan itsestään ja jatkaa palamista ilman ulkoista lämmön lähdettä. [30]

Öljyn ikääntyessä sen tulisi pysyä kemiallisesti stabiilina. Suurin uhka öljyn kemialliselle stabiiliudelle on hapettuminen. Hapettumisen myötä öljyn happopitoisuus nousee ja öljy sakkaantuu. Sakkaa muodostuu muuntajan kiinteiden eristeiden pinnalle, jossa se voi tukkia öljykanavat ja näin vaikeuttaa öljyn kiertoa jäähdytysjärjestelmässä. Öljyn muodostuvat hapot ovat orgaanisia eivätkä kovin syövyttäviä, mutta ne voivat silti nopeuttaa kiinteän eristyksen rappeutumista. [8] Happopitoisuus myös kiihdyttää öljyn hapettumista entisestään. Öljyn happopitoisuus ilmaistaan yksiköllä mg KOH/g, joka ilmaisee grammassa öljyä olevan hapon neutralisoimiseen tarvittavan kaliumhydroksidin määrän [30].

Tärkeimmät öljyn hapettumista kiihdyttävät tekijät ovat lämpötilan nousu ja kosketus ilman kanssa. Muuntajan sydämessä käytetty rauta ja käämien kupari toimivat katalyyttinä öljyn hapettumisreaktiossa. Kiinteät eristeet kuitenkin rajoittavat näiden muuntajan osien kosketusta öljyyn. Teräksinen muuntajasäiliö voidaan myös maalata öljyä hylkivällä maalilla hapettumisen hidastamiseksi. Muuntajaöljyihin lisätään usein myös hapettumisenestoaineita hidastamaan hapettumisreaktiota. [8]

Veden kyllästyspiste kertoo, kuinka paljon kosteutta öljy voi korkeintaan sitoa itseensä. Veden liukenemiskyky öljyyn kasvaa lämpötilan noustessa. Öljyyn voi päätyä kosteutta esimerkiksi absorptioon myötä ilmasta tai paperieristeen hajoamistuotteena syntyvästä vedestä. Kun öljyn kosteuspitoisuus kasvaa, sen läpilyöntilujuus pienenee. Öljyn vesipitoisuutta kuvataan yksiköllä ppm (parts per million). [8]

Öljyn kuntoa voidaan seurata mittaamalla sen rajapintajännitystä. Rajapintajännitys tarkoittaa kahden eri molekyylin rajapinnan välistä vastusvoimaa. Rajapintajännityksen arvolla ei juurikaan ole vaikutusta muuntajan toimintaan, mutta sen muutos käytön aikana kertoo öljyn kunnosta. Rajapintajännityksellä on yhteys öljyn sakkaantumiseen. Jos rajapintajännitys pienenee öljyn elinkaaren aikana, on sakan muodostuminen todennäköistä. [13] [31]

## 4.2 Sähköiset ominaisuudet

Sähköiset ominaisuudet kuvaavat eristysaineen käyttäytymistä sähkökentässä. Tärkeimmät eristeen sähköiset ominaisuudet ovat sen permittiviteetti, dielektrisien häviöiden suuruuden määräävä häviökerroin ja läpilyöntijännite.

Aineen permittiviteetti määrää, kuinka suuren sähkövuontiheyden tietty sähkökentän voimakkuus aiheuttaa aineeseen. Sähkövuontiheyttä kuvaa yhtälö

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E},$$

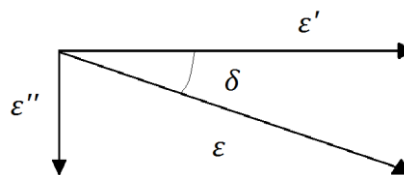
jossa  $\bar{D}$  on sähkövuontiheys,  $\varepsilon$  on permittiviteetti ja  $\bar{E}$  on sähkökentän voimakkuus. Yleensä puhutaan eristeen suhteellisesta permittiviteetistä, jota kuvaa yhtälö

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0},$$

jossa  $\varepsilon_0$  on tyhjiön permittiviteetti ja  $\varepsilon_r$  on suhteellinen permittiviteetti. Tyhjiön permittiviteetin arvo on  $8,85 \cdot 10^{12}$  As/Vm. Permittiviteetillä on suuri merkitys useampia materiaaleja sisältävien eristysrakenteiden suunnittelun kannalta, sillä se vaikuttaa jänniterasituksen jakautumiseen eri eristysmateriaalien välillä. Yleensä kerrostettujen eristeiden tapauksessa pienimmän permittiviteetin aineeseen kohdistuu suurin rasitus. [32]

Dielektriset häviöt ovat eristeessä syntyviä tehohäviöitä, jotka johtuvat vaihtojännitteen aiheuttamasta polarisaation suunnan vaihtelusta eristeessä. Polarisaatio tarkoittaa ilmiötä, jossa sähkökenttään tuotavan aineen atomien ja molekyylien positiivisiin ja negatiivisiin osiin kohdistuu voima, jonka vaikutuksesta osat siirtyvät hieman normaalista asennostaan. Vaihtojännitteellä polarisaatio aiheuttaa molekyylien kääntyilemistä edestakaisin, mikä johtaa eristeen lämpenemiseen kitkan vaikutuksesta. Dielektrisiä häviöitä syntyy myös siitä, ettei mikään eriste ole ideaalinen vaan niissä on jonkin verran johtavuutta. Yleensä johtavuus kasvaa eristeen lämpötilan noustessa, jolloin myös tehohäviöt kasvavat. [32]

Eristeen permittiviteetti vaikuttaa siinä tapahtuviin häviöihin. Eristeen häviökerroin saadaan johdettua permittiviteetin osoitinpiirroksesta, joka on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Kompleksinen permittiviteetti. Muokattu lähteestä [32].

Eristeen permittiviteetti on kuvan mukaisesti kompleksinen ja voidaan lausua yhtälön

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon \angle -\delta$$

mukaan. Yhtälössä  $\varepsilon'$  määräytyy polarisaatiosta,  $\varepsilon''$  johtavuudesta ja häviökulma  $\delta$  kuvaa eroa ideaaliseen eristeeseen. Häviökulmaa voidaan kuvata yhtälöllä

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \approx \frac{\varepsilon''}{\varepsilon}.$$

Suuretta  $\tan \delta$  kutsutaan eristeen häviökertoimeksi. Koska dielektristen häviöiden kasvu kertoo eristeen kunnan huononemisesta, voidaan eristeen kuntoa arvioida eristyksen häviökerroinmittauksien avulla.

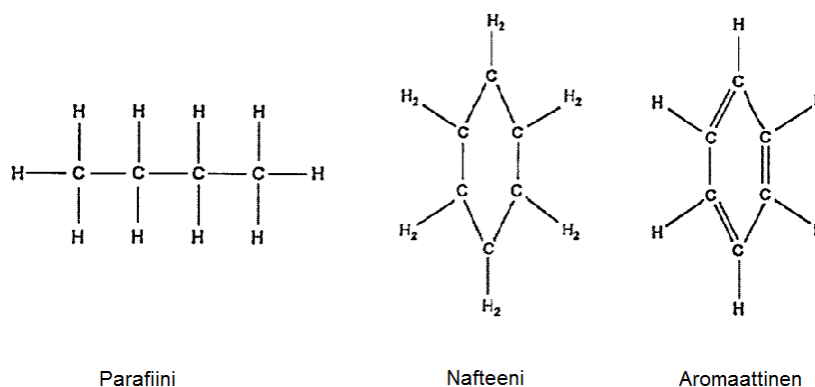
Läpilyöntijännite tarkoittaa pienintä jännitettä, jolla eristysmateriaali ei enää pysty estämään varauksenkuljettajien määrän eksponentiaalista kasvua kahden elektrodin välillä. Läpilyöntiprosessit ovat erilaisia eri materiaaleissa. Nesteissä on epäpuhtauksia, jotka tuottavat nesteeseen vapaita varauksenkuljettajia metallin ja nesteen rajapinnoilla tapahtuvien sähkökemiallisten reaktioiden takia. Jännitteen kasvaessa yhä useampi syntyvistä ioneista kulkeutuu elektrodeille. Nesteen hapettua ja kosteuspitoisuuden kasvaessa myös vuotovirta kasvaa. Sähkökenttä kohdistaa katodilta erkaantuviin ja nesteessä oleviin elektroneihin sähkökentän suuntaan nähden vastakkaisen voiman. Jos sähkökentältä saatu energia on tarpeeksi suuri, elektronit voivat aiheuttaa molekyylien dissosiaatiota sysäysionisaation kautta. Tällöin nesteeseen syntyy mikroskooppisen pieniä kaasukuplia etenkin juuri katodin lähelle, missä elektroneja on paljon. Kuplia voi syntyä myös kiinteiden epäpuhtauksien ympärille. Kupla-alueilla voi syntyä Townsend-tyyppisiä vyöryjä ja uusia vapaita varauksia.

Myös lämpötila ja paine vaikuttavat nesteen läpilyöntilujuuteen. Kun lämpötila kasvaa, eristeen viskositeetti pienenee ja elektronien nopeus kasvaa sysäysten välillä. Paineen kasvaessa taas kuplien syntyminen nesteeseen on vaikeampaa. Jos elektrodin läheisyyteen muodostuu jono kuplia, voi siihen syntyä ionisoitunut kanava. Näissä kanavissa voi kehittyä purkauksen seuraava vaihe eli streamer-purkaus. Kun streamer-purkaus on kulkenut elektrodilta toiselle, jää sen jälkeen alentuneen tiheyden kanava, jota pitkin pääsee kulkemaan jatkuva virta.

Käytössä olevan nesteen sähkölujuuden arvioiminen on vaikeaa, koska hapettuminen, elektrodimateriaalien liukeneminen ja muut epäpuhtaudet laskevat läpilyöntilujuutta. Läpilyöntilujuus riippuu myös elektrodien välimatkasta. Yleensä elektrodivälin kasvaessa läpilyöntijännite pienenee. [32]

### 4.3 Mineraaliöljy

Mineraaliöljy on hyvän saatavuutensa ja edullisuutensa vuoksi yleisin muuntajissa käytetty öljy. Mineraaliöljy valmistetaan tislaamalla raa'asta maaöljystä. Maaöljy koostuu hiilestä, vedystä ja pienistä määristä epäpuhtauksia, kuten rikkiä, happea ja typeä. Hiilivetymolekyylit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: parafiinit, nafteenit ja aromaattiset hiilivedyt. [8] [32] Esimerkit näistä molekyylirakenteista on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11** Erilaisia hiilivetymolekyylejä. Muokattu lähteestä [8].

Kuten kuvasta huomataan, parafiineissa hiiliatomit ovat kiinnittyneet toisiinsa suorana ketjuna. Yksinkertaisimmassa parafiinissa on ainoastaan yksi hiiliatomi, eikä hiiliketjun suurinta mahdollista pituutta ole rajoitettu. Parafiiniset aineet ovat heikkoja lämpöominaisuuksiltaan ja vesi sekä hapettumisen reaktiotuotteet liukenevat niihin huonosti. Nafteneissa hiiliatomit ovat kiinnittyneet toisiinsa renkaan muodossa. Kuvan mukaiset kuuden hiiliatomin renkaat ovat maaöljyissä yleisimpiä, mutta myös viiden ja seitsemän hiiliatomin renkaita esiintyy. Renkaita voi olla myös useampi kiinnittyneenä yhteen. Nafteneilla on erinomaiset alhaisen lämpötilan ominaisuudet ja niiden veden liuotuskyky on parafiineja parempi. Myös aromaattiset hiilivedyt muodostuvat kuuden hiiliatomin renkaista, mutta nafteneista poiketen osa hiiliatomeista on kiinnittynyt toisiinsa kaksoissidoksella. Kaksoissidokset vaikuttavat aineeseen tehden siitä tyydyttymättömän ja siten reaktiivisemmän. Aromaattiset hiilivedyt voidaan jakaa kahteen ryhmään: yhden hiilirenkaan monoaromaattisiin ja useamman renkaan polyaromaattisiin. [8] [13]

Käytännössä eri tyyppin molekyylit ovat mineraaliöljyissä aina kiinnittyneet toisiinsa muodostaen erilaisia molekyylilyhdistelmiä. Muuntajaöljyt jaetaankin yleensä nafteni- ja parafiiniöljyihin sen perusteella, kumpaa molekyylityyppiä ne sisältävät enemmän. Ominaisuuksiensa vuoksi muuntajissa käytetään pääasiassa nafteneita. Mineraaliöljyn ominaisuuden riippuvat sen raaka-aineena käytetyn maaöljyn ominaisuuksien lisäksi myös öljyn valmistustavasta. Eri öljy-yhtiöt käyttävät hieman toisistaan poikkeavia valmistustapoja luodakseen tarpeitaan vastaavan tuotteen. [13] [32]

Mineraaliöljyihin lisätään yleensä erilaisia inhibiittoreita hidastamaan niiden hapettumisreaktiota, jotta öljyn ja myös paperieristeen ikääntyminen hidastuisi. Yleisimmät muuntajaöljyissä käytetyt hapettumisenestoaineet ovat 2,6-ditertiaaributyyli-parakresoli ja 2,6-ditertiaaributyyli-fenoli. Mineraaliöljyjä käsittelevä standardi IEC 60296 jakaa öljyt kolmeen eri luokkaan sen perusteella, paljonko ne sisältävät hapettumisenestoainetta: inhibiittorittomiin öljyihin, alle 0,08 %:n inhibiittoripitoisuuden öljyihin ja 0,08–0,40 %:n inhibiittoripitoisuuden öljyihin. Öljyn inhibiittoripitoisuus pienenee muuntajakäytössä, ja inhibiittoreita voidaan tarvittaessa lisätä öljyyn sen elinkaaren aikana. [33] [34]

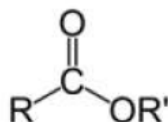
Joissakin Fingridin uusimmista suurjännitemuuntajissa käytetään eristeöljynä Shell Diala S4 ZX-I nimistä öljyä, joka on valmistettu maaöljyn sijasta kaasusta GTL-tekniikalla (gas to liquid). Shellin GTL-öljy on pääasiassa vertailtavissa ominaisuuksiensa puolesta mineraaliöljyjen kanssa ja noudattaa mineraaliöljyjen standardia IEC 60296. Öljy sisältää kuitenkin vähemmän epäpuhtauksia kuin mineraaliöljyt ja on kokonaan rikitön. [35] Tässä työssä Shellin valmistamaa Diala S4 ZX-I öljyä käytetään vertailukohteena este-reille, sillä öljyn tuotetiedot on ilmoitettu IEC:n testimenetelmien avulla ja ovat näin suoraan vertailukelpoisia esterööljyjen tietojen kanssa. Lisäksi Shellin öljyä käytetään uusissa Fingridin suurjännitemuuntajissa, jolloin se on myös yrityksen kannalta hyvä vertailu-kohde uusille öljyvaihtoehdoille.

## 5. ESTERIÖLJYJEN TEKNISET OMINAISUUDET

Esterit voidaan jakaa synteettisiin ja luonnollisiin estereihin niiden raaka-aineiden ja valmistustavan mukaan. Tässä luvussa eritellään molempien esterityyppien sähköisiä ja fyysisiä ominaisuuksia ja verrataan niitä Fingridin muuntajissa käytössä oleviin mineraaliöljyihin.

### 5.1 Raaka-aineet ja rakenne

Esteriöljyt ovat saaneet nimensä kemiallisesta sidoksesta, joka muodostuu alkoholin ja rasvahapon reaktiotuotteena. Esterisidos on esitetty kuvassa 12.



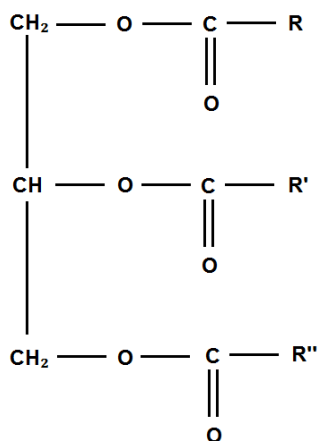
*Kuva 12 Esterisidos [5].*

Molekyylikaavassa R ja R' esittävät hiiliatomien ketjuja, jotka voivat olla keskenään joko samat tai erilaiset. Esterisidoksia esiintyy sekä luonnollisessa että synteettisessä esterissä.

Tässä työssä esitellään M&I Materialsin valmistamia Midel-öljyjä ja Cargillin valmistamia Envirotamp-öljyjä. Midel-esteriöljyt ovat olleet markkinoilla jo 1970-luvulta asti, minkä vuoksi sitä pidetään johtavana tuotemerkinä. Vaikka Cargillilla on myös usean vuosikymmenen kokemus eristeöljyjen kehityksestä, on yritys melko uusi esteriöljymarkkinoilla. M&I Materialsin ja Cargillin öljyt on valittu työssä tutkittaviksi, koska ne ovat tällä hetkellä tunnetuimmat markkinoilla saatavilla olevat esteriöljyt.

Luonnolliset esterit valmistetaan kasviöljyistä. Käytettyjä raaka-aineita ovat muun muassa sojaöljy, auringonkukkaöljy, rapsiöljy tai oliiviöljy. Tässä työssä esitellään kolme eri luonnollista esteriä: M&I Materialsin Midel eN 1204 ja Midel eN 1215 sekä Cargillin Envirotamp FR3. Envirotamp FR3 ja Midel eN 1215 on valmistettu soijapapuöljystä, kun taas Midel eN 1204 on rapsiöljypohjainen.

Luonnollisen esterin molekyylirakenteen pääkomponentti on triglyseridi. Triglyseridi koostuu glyserolimolekyylistä ja siihen esterisidoksella linkittyneistä rasvahappoketjuista. [36] [37] [38] [39] Triglyseridin molekyylirakenne on esitetty kuvassa 13.

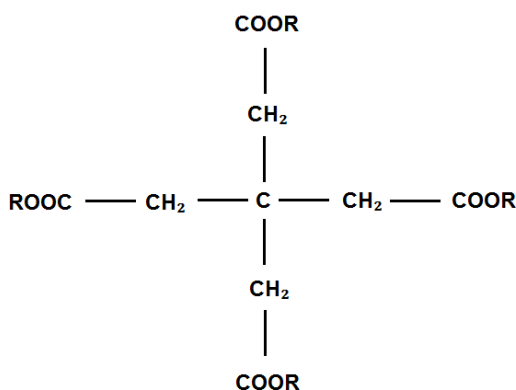


**Kuva 13** Luonnollisen esterin rakenne. Muokattu lähteestä [40].

Molekyyli­rakenteessa esiintyvät R:t kuvaavat 1–22 hiiliatomin ketjuja. Rasvahapot voivat olla tyydyttyneitä tai tyydyttymättömiä ja ne voivat sisältää 1–3 kaksoissidosta. Valmistajat voivat valita kaksoissidoksen määrän valmiin esterin haluttujen ominaisuuksien perusteella. Tyydyttyneillä estereillä on korkea viskositeetti ja siten huonommat lämmön­siirto-ominaisuudet, kun taas tyydyttymättömät esterit hapettuvat herkemmin. [36]

Tässä työssä esitellään kaksi synteettistä esteriä: M&I Materials Ltd:n Midel 7131 ja Cargillin Envirotemp 200. Synteettiset esterit voidaan jakaa seitsemään ryhmään: diesterit, ftalaatit, trimelliitit, pyromelliitit, dimeerihappoesterit, polyolierit ja polyolaatit. Synteettiset esterit valmistetaan alkoholin ja rasvahappojen reaktion avulla. Synteettisten esterien valmistuksessa voidaan käyttää joko synteettisiä tai luonnollisia karboksyyli­happoja. Raaka-aineena voidaan käyttää esimerkiksi raakaöljyä tai erilaisia kasviöljyjä. Synteettisten esterien raaka-aineet valitaan yleensä saatavuuden perusteella. Tyypillisiä synteetisoinnissa käytettäviä alkoholeja ovat neopentylglykooli, trimetylolipropaani, pentaerytritoli ja dipentaerytritoli. [41] [42] [43]

M&I Materials Ltd:n valmistaman Midel 7131:n valmistuksessa käytetään alkoholina pentaerytritolia [36]. Pentaerytritoliesterin kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 14.



**Kuva 14** Synteettisen esterin rakenne. Muokattu lähteestä [40].



Molekyylikaavassa esteriryhmiä merkitään lyhenteellä COOR. Rakenteen neljän esteriryhmän R-ryhmät voivat olla keskenään joko samanlaiset tai erilaiset. COOR-ryhmän happiatomien korkea elektronegatiivisuus tekee synteettisestä esteristä polaarisen kuin hiilivetyrakenteeseen perustuva mineraaliöljy. Tästä seuraa, että synteettisellä esterillä on korkeampi suhteellinen permittiviteetti ja alempi resistiivisyys kuin mineraaliöljyllä. [36]

## 5.2 Fysikaaliset ominaisuudet

Luonnollisten ja synteettisten esterien tärkeimpiä fysikaalisia ominaisuuksia on koottu taulukkoon 3. Ominaisuudet on koottu valmistajien ilmoittamista tuotetiedoista. Ominaisuuksia verrataan IEC:n luonnollisen esterin ja mineraaliöljyn standardien määrittelemiін arvoihin, sekä Shell Diala S4 ZX-I:n ominaisuuksiin.

**Taulukko 3** Luonnollisten ja synteettisten esterien fysikaalisia ominaisuuksia [33] [35] [37] [38] [39] [44] [45] [46] [47] [48].

	Viskositeetti (mm <sup>2</sup> /s)					Jähmettymispiste (°C)	Leimahduspiste (°C)
	−30 °C	−20 °C	0 °C	40 °C	100 °C		
Luonnollinen esteri (IEC 62770)				≤ 50	≤ 15,5	≤ −10	≥ 250
Midel eN 1204			232	37	8,3	−31	> 315
Midel eN 1215			206	32	7,6	−18	> 315
Envirotemp FR3			190	32–34	7,7–8,3	−18 – −23	255
Synteettinen esteri (IEC 61099)		≤ 3000		≤ 35		≤ −45	≥ 250
Midel 7131	4200	1440		29	5,3	−56	260
Envirotemp 200		1500		31	5,6	< −45	> 250
Mineraaliöljy (IEC 60296)	≤ 1800			≤ 12		≤ −40	≥ 135
Shell Diala S4 ZX-I	382			9,6		−42	≥ 191

Kuten taulukosta huomataan, luonnolliset esterit ovat alhaisissa lämpötiloissa ominaisuuksiltaan mineraaliöljyjä ja synteettisiä estereitä heikompia. Vaikka mineraaliöljyn ja synteettisen esterin jähmettymispiste on selkeästi luonnollisia estereitä alhaisempi, on eri luonnollisten esterienkin välillä huomattavia eroja. Midel eN 1215:n ja Envirotemp FR3:n jähmettymispisteet ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta Midel eN 1204:n jähmettymispiste on noin kymmenen astetta niitä alhaisempi. Myös vertailtavien synteettisten esterien jähmettymispisteet poikkeavat toisistaan jopa 9 °C.

IEC on määritellyt luonnollisten esterien jähmettymispisteen ylärajaksi −10 °C. Synteettisten esterien jähmettymispisteen yläraja −45 °C on siis 35 °C luonnollisten esterien ja myös 5 °C mineraaliöljyjen jähmettymispisterajaa alhaisempi. Vaikka synteettisten esterien jähmettymispiste on hieman mineraaliöljyjä matalampi, kasvaa sen viskositeetti lämpötilan laskiessa huomattavasti nopeammin. Esteriöljy ei siis lähellä jähmettymispistettään virtaa enää yhtä hyvin kuin mineraaliöljy samassa lämpötilassa. Korkeammissa lämpötiloissa esterien ja mineraaliöljyjen viskositeettien arvot ovat melko lähellä toisiaan.

Esterien biohajoavuuden lisäksi huomattava etu mineraaliöljyihin nähden on niiden korkea leimahduspiste. Envirotemp FR3:n leimahduspiste on 64 °C ja Midelin luonnollisten esterien leimahduspisteet ovat jopa 124 °C Shell Diala S4 ZX-I:n leimahduspistettä korkeampia. Myös molempien vertailtavien synteettisten esteriöljyjen leimahduspiste on yli 50 °C Shellin öljyä korkeampi.

Esteriöljyt ovat molekyyliarakenteensa esteriryhmien vuoksi polaarisia aineita. Polaarisuutensa vuoksi ne vetävät puoleensa vesimolekyyliä ja muodostavat niiden kanssa herkästi sidoksia. Esterisidosten määrän vaikutus veden kyllästyspisteeseen öljyssä on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4** Esterisidosten määrän vaikutus veden kyllästyspisteeseen [5].

	Esterisidosten määrä	Veden kyllästymispiste 23 °C:ssa (ppm)
Mineraaliöljy	0	55
Luonnollinen esteri	3	1100
Synteettinen esteri	4	2600

Mineraaliöljyssä ei ole lainkaan esterisidoksia, minkä vuoksi sen veden kyllästyspiste on huomattavasti esteriöljyä pienempi. Luonnollisen esterin veden kyllästyspiste on 20-kertainen ja synteettisen esterin lähes 50-kertainen mineraaliöljyyn verrattuna. Esterit pystyvät siis sitomaan itseensä huomattavasti enemmän kosteutta menettämättä kuitenkaan eristysominaisuuksiaan.

Luonnollisten esterien suurin heikkous huonojen alhaisten lämpötilojen ominaisuuksien lisäksi on niiden herkkyys hapettumiselle. Öljyn hapettumista voidaan mitata nopeutetun hapettumisen testillä. Esterien ja mineraaliöljyn hapettumistestit eroavat toisistaan hie-man öljyn tyypistä riippuen. Mineraaliöljyn hapettumistestin kesto määräytyy öljyn valmistuksessa käytettyjen lisäaineiden perusteella. Vertailussa käytettävä mineraaliöljyihin rinnastettava GTL-öljy Shell Diala S4 ZX-I sisältää hapettumisenestoaineita, joten standardin IEC 60296 mukaan sen hapettuminen on testattu 120 °C:ssa 500 tuntia kestäväällä kokeella. Shellin muuntajaöljy on myös suunniteltu täyttämään standardin tiukemmat määrittelyt paremman hapettumisenkeston ja alhaisen rikki-pitoisuuden öljyille. Vertailtavien esterien nopeutettu hapettuminen on testattu 120 °C:ssa 48 tuntia kestäväällä kokeella. Hapettumiskokeen tuloksia on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5** Luonnollisten esterien hapettumistestin tuloksia [44] [37] [38] [39].

	Happoluku ennen hapettumiskoetta (mg KOH/g)	Happoluku (mg KOH/g)	Viskositeetti (mm <sup>2</sup> /s) 40 °C:ssa	Häviökerroin tanδ 90 °C:ssa
Luonnollinen esteri (IEC 62770)	≤ 0,06	≤ 0,6	korkeintaan 30 % alkuperäistä suurempi	≤ 0,5
Midel eN 1204	≤ 0,04	< 0,1	8 %	< 0,1
Midel eN 1215	≤ 0,04	< 0,07	15,7%	0,05
Envirotemp FR3	0,013–0,042	0,1	17,1%	0,1
Mineraaliöljy (IEC 60296)	≤ 0,01	≤ 0,3	-	≤ 0,05
Shell Diala S4 ZX-I	<0,01	0,02	-	0,001

Taulukosta nähdään, että esteriöljyjen happopitoisuudet eivät juuri eroa toisistaan hapettumiskokeen jälkeen. Shell Diala S4 ZX-I:n happoluku on ennen koetta ja sen jälkeen luonnollisia estereitä hieman pienempi. Viskositeetin kasvussa on sen sijaan hieman suurempia eroja. Midel eN 1204:n viskositeetti nousi alkuperäisestä vain 8 %, kun kahden muun öljyn viskositeetti nousi yli 15 %. IEC:n mineraaliöljystandardi ei vaadi viskositeetin mittaamista hapettumiskokeen yhteydessä. Midel eN 1215:n häviökerroin on hapettumistestin jälkeen öljyistä pienin, vain puolet muiden öljyjen häviökertoimista, mutta silti huomattavasti Shellin öljyä suurempi. Hapettumistuloksia ei kuitenkaan voi pitää vertailukelpoisina keskenään, sillä Shellin öljyn hapettumiskoe kesti noin kymmenen kertaa niin pitkään kuin luonnollisten esterien koe. Nopea hapettuminen onkin luonnollisten esterien heikkous, jonka vuoksi niitä voidaan käyttää eristeenä vain hermeettisesti suljeuissa muuntajissa.

Synteettiset esterit kestävät hapettumista luonnollisia estereitä paremmin. Midel 7131 ja Envirotemp 200 on testattu synteettisten esterien standardin IEC 61099 mukaisesti 164 tuntia kestäväällä hapettumiskokeella. Synteettisten esterien hapettumistestien tuloksia vertaillaan Shell Diala S4 ZX-I:n hapettumistestin tuloksiin. Kokeiden perusteella saadut valmistajien ilmoittamat tulokset on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6** Synteettisten esterien hapettumistestin tuloksia [33] [45] [35] [46] [47].

	Happoluku ennen hapettumiskoetta (mg KOH/g)	Happoluku kokeen jälkeen (mg KOH/g)	Liete (%)
Synteettinen esteri (IEC 61099)	≤ 0,03	≤ 0,3	≤ 0,01
Midel 7131	<0,03	0,02	< 0,01
Envirotemp 200	0,01	0,25	0,005
Mineraaliöljy (IEC 60296)	≤ 0,01	≤ 0,3	≤ 0,05
Shell Diala S4 ZX-I	<0,01	0,02	< 0,01

Taulukosta huomataan, että kumpaakaan vertailtavaan synteettiseen esteriin ei muodostu merkittävästi lietettä hapettumiskokeen aikana. Muodostuneen lietteen määrä on myös samalla tasolla mineraaliöljyn kanssa. Shell Diala S4 ZX-I:n ja Midel 7131:n happoluku

ei muutu merkittävästi hapettumiskokeen aikana. Envirotemp 200:n happoluku taas kasvaa 25-kertaiseksi hapettumiskokeen aikana. Tässäkään tapauksessa hapettumiskokeiden tulokset eivät ole täysin verrattavissa kokeiden eri kestojen vuoksi. Synteettisten esterien voidaan kuitenkin todeta olevan hapettumisenkestoltaan huomattavasti luonnollisia esteireitä parempia.

### 5.3 Sähköiset ominaisuudet

Kolmen luonnollisen esterin ja kahden synteettisen esterin sähköisiä ominaisuuksia on koottu niiden tuotetiedoista taulukkoon 7. Niiden ominaisuuksia verrataan IEC:n luonnollisen esterin ja mineraaliöljyn standardien määrittelemiä arvoihin, sekä Fingridin uusissa muuntajissa käytettävän Shell Diala S4 ZX-I:n ominaisuuksiin. Standardit määrittelevät arvot, joita vähintään noudattamalla öljyt ovat kelvollisia muuntajakäyttöön.

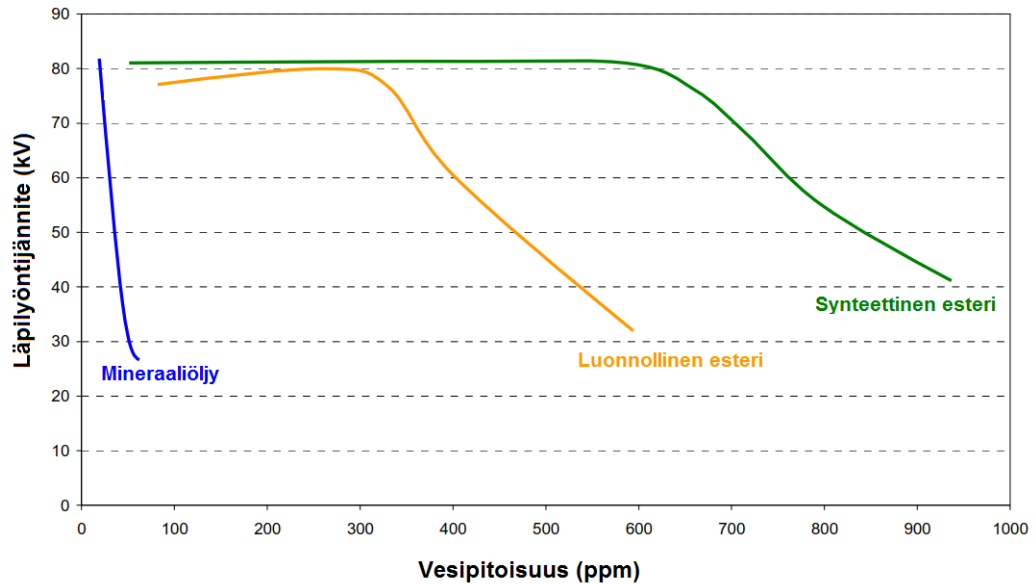
**Taulukko 7** Luonnollisten ja synteettisten esterien sähköisiä ominaisuuksia [33] [35] [37] [38] [39] [45] [46] [47].

	Häviökerroin $\tan\delta$ 90 °C:ssa	Läpilyöntijännite (kV)
Luonnollinen esteri (IEC 62770)	$\leq 0,05$	$\geq 35$
Midel eN 1204	$< 0,03$	$> 75$
Midel eN 1215	$< 0,03$	$> 75$
Envirotemp FR3	0,02	73
Synteettinen esteri (IEC 61099)	$\leq 0,03$	$\geq 45$
Midel 7131	$< 0,008$	$> 75$
Envirotemp 200	0,02	$> 60$
Mineraaliöljy (IEC 60296)	$\leq 0,005$	$\geq 30$
Shell Diala S4 ZX-I	$< 0,001$	60

Taulukosta nähdään, että luonnollisten esterien sähköiset ominaisuudet ovat keskenään hyvin samanlaiset. Luonnollisten esterien häviökertoimet ovat Shellin öljyyn verrattuna jonkin verran suurempia, mutta eivät merkittävästi. Läpilyöntijännitteet taas ovat luonnollisilla estereillä hieman korkeammat. Synteettiset esterit Midel 7131 ja Envirotemp 200 sekä mineraaliöljy Shell Diala S4 ZX-I ovat taulukon perusteella sähköisiltä ominaisuuksiltaan melko samanlaiset. Midel 7131:llä on kuitenkin hieman muita öljyjä korkeampi läpilyöntilujuus. Kaikkien vertailtavien öljyjen sähköiset ominaisuudet ovat myös hieman standardeissa määriteltyjä ohjearvojaan paremmat.

Elektrodivälin leveys vaikuttaa läpilyöntijännitteen suuruuteen. Taulukossa 7 esitetyt läpilyöntijännitteen arvot on mitattu 2,5 mm elektrodivälillä. Esteriöljyillä läpilyöntilujuus on suurissa väleissä kuitenkin huomattavasti mineraaliöljyä heikompi. [36] Midel-estereitä valmistavan öljy-yhtiö M&I Materialsin ja muuntajavalmistaja Siemensin edustajien mukaan tämä ongelma voidaan kuitenkin ratkaista laittamalla muuntajaan enemmän paperieristettä, jolloin öljyvälit jäävät kapeammiksi. [43]

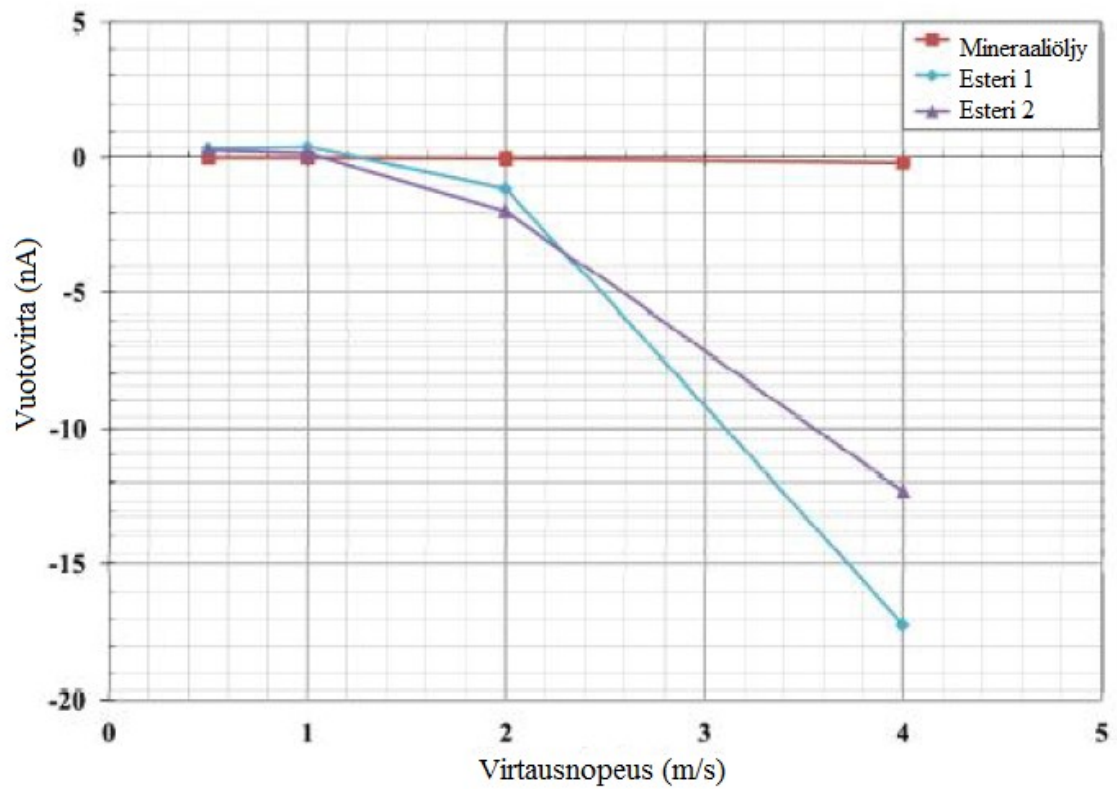
Eräs merkittävä läpilyöntilujuuteen vaikuttava tekijä ovat myös öljyssä esiintyvät epäpuhtaudet. Epäpuhtauksia ovat esimerkiksi pienhiukkaset, vesi tai ilmakuplat. Öljyn kunto voi siis vaikuttaa sen läpilyöntilujuuteen öljyn teknisiä ominaisuuksia enemmän. [5] Kuvassa 15 on esitetty eri öljyjen vesipitoisuuden vaikutus niiden läpilyöntilujuuteen.



**Kuva 15** Kosteuspitoisuuden vaikutus öljyn läpilyöntilujuuteen. Muokattu lähteestä [5].

Esterit ovat mineraaliöljyjä polaarisempia aineita, minkä vuoksi ne sitovat itseensä tehokkaammin vettä. Kuten kuvasta 11 nähdään, esterien läpilyöntilujuus pienenee mineraaliöljyä hitaammin vesipitoisuuden kasvaessa. Kun mineraaliöljyn kosteuspitoisuus nousee noin 40 ppm:ää, sen läpilyöntijännite laskee yli 50 kV. Tällöin mineraaliöljyn vesipitoisuus on vielä alle 100 ppm. Luonnollisen esterin läpilyöntilujuus taas alkaa laskea vasta sen vesipitoisuuden ollessa noin 300 ppm. Synteettisen esterin läpilyöntilujuus alkaa pienentyä vasta vesipitoisuuden ollessa noin 600 ppm.

Esteriöljyjen taipumus staattisten sähkövarausten muodostamiseen on mineraaliöljyjä suurempi. Mikäli varauksenkuljettajia syntyy öljyyn liikaa, voi seurauksena olla läpilyönti. Staattisia sähkövarauksia syntyy öljyn virratessa muuntajan sisällä. Kuvassa 16 on esitetty staattisista sähkövarauksista syntyvä vuotovirta öljyn virtausnopeuden funktiona.



**Kuva 16** Staattisista sähkövarauksista syntyvä vuotovirta öljyn virtausnopeuden funktiona [49].

Kuvasta nähdään, että mineraaliöljyssä ei juurikaan synny staattisia varauksia. Testatuissa estereissä taas alkaa esiintyä vuotovirtoja jo yli 1 m/s virtausnopeuksilla. Esteriöljyjen kohdalla virtausnopeudet on rajoitettava etenkin suuritehoisten muuntajien kohdalla niin, että varauksenkuljettajia ei synny liikaa. Virtausnopeus on otettava huomioon muuntajan jäähdytysjärjestelmän suunnittelussa ja muuntajaöljyn täyttövaiheessa. [50]

## 6. ESTERIÖLJYJEN SOVELTUVUUS KANTAVERKON SUURJÄNNITEMUUNTAJIIN

Fingridillä on kantaverkon muuntajien ominaisuuksille tarkat tekniset vaatimukset ja muuntajien on oltava vaihtokelpoisia keskenään. Jotta kantaverkossa voidaan ottaa käyttöön esterieristeinen muuntaja, on sen täytettävä mineraaliöljymuuntajillekin asetetut kriteerit. Tässä luvussa pohditaan luonnollisten ja synteettisten esterien soveltuvuutta käytettäväksi kantaverkon suurjännitemuuntajien eristysnesteinä muuntajan rakenteen, kunnonhallinnan ja Suomen ilmasto-olosuhteiden osalta.

### 6.1 Muuntajan rakenne ja valmistus

Kantaverkon suurjännitemuuntajien fyysiset mitat määräytyvät nimellistehon ja jännitetaso asettamien vaatimusten lisäksi Suomen rauta- ja maanteiden kuljetusaukon mukaan [2]. Tämä tarkoittaa sitä, että tiettyjä mittoja suurempaa muuntajaa ei pystytä kuljettamaan sähköasemalle. Fingridin nykyiset muuntajat ovat fyysiseltä kooltaan jo niin suuria, että ulkomittoja ei enää voi kasvattaa.

Kuten luvussa 4 todettiin, estereillä on pitkissä öljyväleissä mineraaliöljyä huonompi läpilyöntilujuus. Tämän vuoksi esterimuuntajassa tarvitaan enemmän prespaanikerroksia rajoittamaan öljyväliden leveyttä. Kiinteitä eristyskerroksia tarvitaan lisää erityisesti eri käämitysten ja eri vaiheiden välillä. Esterien huonomman sähkölujuuden vuoksi esimerkiksi Vattenfall tilasi 400 kV:n jännitetasoon käytettäväksi 550 kV:n testijännitteellä koetetun generaattorimuuntajan, jotta muuntajan kestävyys käyttöjännitteillä olisi varmasti mahdollista.

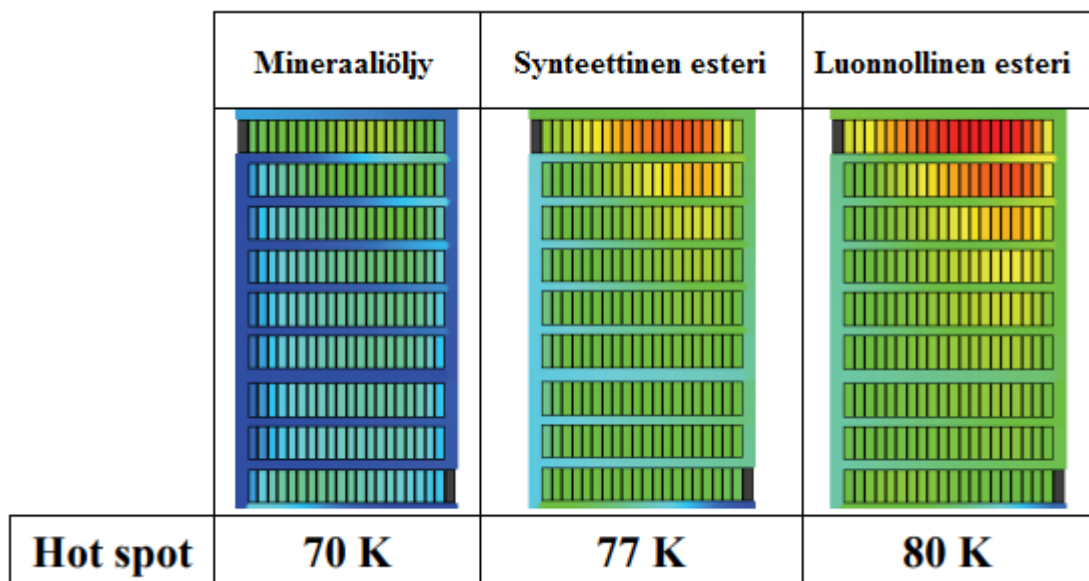
Vaikka kiinteää eristettä tarvitaan enemmän, pitää käämien sisäisten öljykanavien leveyttä kasvattaa hieman, jotta korkeamman viskositeetin esteri pystyy virtaamaan kanavien läpi. Koska muuntajan ulkomitat eivät voi olla nykyisiä kantaverkon vaatimuksia suuremmat, täytyy aktiiviosa suunnitella mineraaliöljymuuntajasta poikkeavaksi. Käämien virrantiheyttä pitää siis kasvattaa, sillä käämejä ei voida rakentaa kokonaisuudessaan nykyistä suuremmaksi, mutta muunto-ominaisuudet tulee pitää samana. Virrantiheyden kasvattaminen lisää muuntajan kuormitushäviöitä. Siemensin asiantuntijoiden arvio muuntajan häviötason nousulle on 3–11 % kuormitushäviöille ja 0–0,5 % tyhjäkäyntihäviöille. [50]

Muuntajan jäähdytysjärjestelmä pitää suunnitella niin, että esteriöljy pääsee huonommasta viskositeetistaan huolimatta kulkemaan sen putkissa riittävällä virtausnopeudella. Normaaleissa käyttöolosuhteissa esterimuuntajan jäähdytysjärjestelmänä toimisi ONAN/ODAF- tai ONAN/OFAF-tyyppinen järjestelmä. Lämpötilan ollessa alle  $-30\text{ °C}$

pumput tulisi pitää päällä jatkuvasti. Vaihtoehtoisesti öljyn virtausnopeutta voidaan seurata ja asettaa pumput kytkeytymään automaattisesti päälle virtausnopeuden pudottua alle sovitun arvon. Pumput pakottavat öljyn kiertämään jäähdytysjärjestelmässä, kun öljyn viskositeetti on noussut niin paljon, että kierto ei onnistu enää pelkän konvektion avulla. Alhaisissa lämpötiloissa myös tuulettimet voidaan sammuttaa, sillä niiden käyttö saattaa viilentää öljyä vielä lisää. Jäähdytysjärjestelmän rakennetta ja ohjaustapaa tulee siis muuttaa, jotta muuntajan käyttö alhaisissa lämpötiloissa on mahdollista. [50]

Esteriöljy on hieman mineraaliöljyä tiheämpää. Tästä ja lisätystä kiinteän eristeen määrästä johtuen esterimuuntaja painaa jonkin verran saman kokoista mineraaliöljymuuntajaa enemmän. Paino ei muodostu muuntajan kuljetuksessa ongelmaksi, sillä muuntaja täytetään öljyllä vasta kuljetuksen jälkeen sähköasemalla. Suurempi paino tulee kuitenkin huomioida aseman rakennusvaiheessa perustusten kestävyudessa. [50]

Esterien mineraaliöljystä poikkeavat ominaisuudet nostavat hot spot –lämpötiloja muuntajan sisällä. Käämien lämpötilan nousun jakaumaa eri eristeöljyissä on mallinnettu kuvassa 17. Lämpötilan nousu ilmoitetaan erotuksena ulkoisen jäähdytysaineen lämpötilaan.



**Kuva 17** Käämien lämpötilajakauma eri öljyissä. Muokattu lähteestä [51].

Kuvassa punainen väri esittää kuumimpia lämpötiloja ja sininen viileimpiä. Kuvasta nähdään, että luonnollisella esterillä eristetyin muuntajan hot spot –lämpötila on kaikista korkein ja mineraaliöljymuuntajan pienin.

Esterien poikkeavia lämpöominaisuuksia on käsitelty paremman termisen kestävyuden materiaaleista rakennettujen muuntajien ominaisuuksia määrittelevässä standardissa IEC 60076–14. Perinteisen muuntajan hot spot –lämpötilat on määritelty standardissa IEC 60076–2. Esterillä eristetyille muuntajalle määriteltyjä lämpötilarajoja on vertailtu



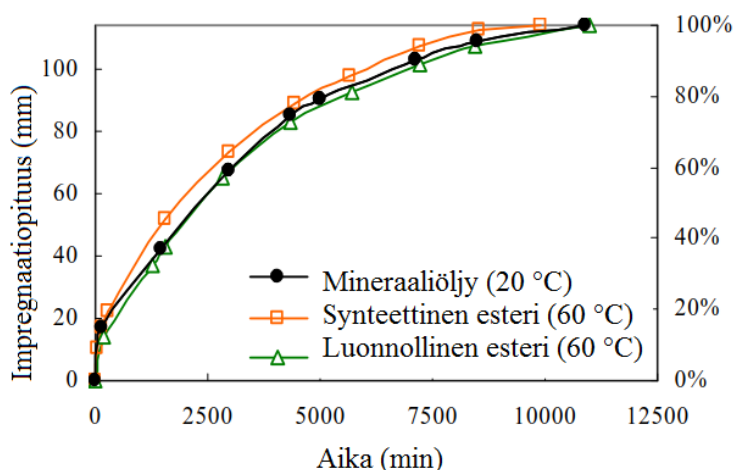
perinteisen muuntajan lämpötilarajoihin taulukossa 8. Taulukosta nähdään, että esteröljymuuntajalle sallitaan perinteistä muuntajaa korkeammat lämpötilat, joten kuvassa 16 mallinnetut käämien korkeammat lämpötilat eivät ole normaaleissa käyttötilanteissa ongelma.

**Taulukko 8** Suurimmat muuntajalle sallitut lämpötilat [52] [19].

	Mineraaliöljy	Esteröljy	
	Kraft-paperi ja termisesti paranneltu paperi	Kraft-paperi	Termisesti paranneltu paperi
<b>Öljyn lämpötila muuntajan yläosassa (K)</b>	60	90	90
<b>Käämien keskimääräinen lämpötila (K)</b>	65 (ON ja OF jäähditys) 70 (OD jäähditys)	75	95
<b>Hot spot lämpötila (K)</b>	78	90	110

Esteröljymuuntajassa voidaan käyttää pääasiassa samoja rakennusmateriaaleja kuin mineraaliöljymuuntajassa. Joitain esterimuuntajaan sopimattomia materiaaleja on kuitenkin löydetty. Muuntajassa käytettävät tiivisteet on erityisesti varmistettava yhteensopivaksi esterien kanssa, sillä jotkin tiivisteaineet saattavat kovettua tai kutistua esterien vaikutuksesta. Esimerkiksi fluorikumi on todettu esterien kanssa yhteensopivaksi tiivistysmateriaaliksi. Sinkillä pinnoitettuja osia ei suositella käytettäväksi esterimuuntajassa, sillä sinkki saattaa reagoida esterien kanssa kemiallisesti. Reaktiotuotteena syntyy vetyä, joka voi vääristää öljyanalyysin tulosta. Sinkkiä käytetään muuntajissa muun muassa radiaattorien sisäpinnoitteena. Vaihtoehtoisena pinnoitteena esterimuuntajassa voidaan käyttää esimerkiksi ruostumatonta terästä. Joitain muitakin yksittäisiä materiaalirajoitteita on, mutta esterimuuntajien valmistajat tuntevat rajoitukset nykyään jo melko hyvin ja käytökelpoiset vaihtoehdot on kartoitettu. [5] [50]

Esteröljyjen fyysisten ominaisuuksien ero mineraaliöljyyn on otettava huomioon myös täytettäessä muuntajaa öljyllä asennusvaiheessa tai tyhjennystä vaatineen huollon jälkeen. Muuntajan täyttövaiheessa on tärkeää, että öljy tunkeutuu selluloosaeristeen pinnimpiinkin huokosiin, jotta eristysrakenteeseen ei jää ilmaa tai muita kuplia. Tätä kutsutaan impregnaatioksi. Esterien huonomman viskositeetin vuoksi ne eivät pääse tunkeutumaan kiinteän eristeen huokosiin yhtä helposti kuin mineraaliöljy. Kuvassa 18 on esitetty erään impregnaatiotestin tulokset.



**Kuva 18** Öljyjen impregnaatiosyvyys ajan suhteen. Muokattu lähteestä [53].

Kokeessa testattiin mineraaliöljyn, luonnollisen esterin ja synteettisen esterin impregnaationopeutta. Testit toteutettiin asettamalla 110×70×33 mm kokoinen prespaanilevy testikammioon, johon testattava öljy ohjattiin tyhjiöpumpun avulla. Prespaani kuivattiin ennen koetta ja viisi sen sivuista pinnoitettiin epoksihartsilla niin, että öljyn tunkeutumispinnaksi jäi yksi 70×33 mm kokoinen sivu. Kokeessa huomattiin, että öljyjen tunkeutuminen prespaaniin tapahtuu suunnilleen samalla nopeudella, kun esterit ovat 60 °C:n lämpötilassa ja mineraaliöljy 20 °C:n lämpötilassa. Prespaanilevyjen täydellisessä impregnoitumisessa kesti noin 7 päivää. Myös Siemensin asiantuntijoiden mukaan muuntajaa täytettäessä esterioöljyllä öljy tulee lämmittää mineraaliöljyä lämpimämmäksi. Mineraaliöljy lämmitetään muuntajaa täytettäessä yleensä 60 °C:n lämpötilaan ja täyttö kestää noin kolme päivää. Esterioöljy puolestaan tulisi lämmittää 80 °C:n lämpöiseksi, jolloin muuntajan täyttö vie noin kymmenen päivää. Täyttönopeudessa on otettava huomioon myös esterien taipumus tuottaa staattisia sähkövarauksia, jotta vuotovirtojen syntyminen voidaan välttää. [3] [50] [53]

## 6.2 Esterimuuntajan lisälaitteet

Materiaalien lisäksi esterimuuntajan lisälaitteiden valintaan tulee kiinnittää huomiota. Käämikytkinvalmistaja Maschinenfabrik Reinhausen GmbH on tutkinut käämikytkimien toimintaa eri öljyissä ja tehnyt listan esterioöljyjen kanssa yhteensopivista käämikytkinmalleista. Esterimuuntajassa voidaan käyttää tyhjiöpullotekniikkaan perustuvia VACUTAP®-käämikytkimiä tai perinteisiä käämikytkimiä, jossa tehokytkimen kosketimet ovat omassa öljysäiliössään. Jälkimmäisen käämikytkimen tehokytkimessä käytettäisiin kuitenkin mineraaliöljyä, sillä esterioöljyn kyky sammuttaa tehokytkimessä syntyvät valokaaret on vaikea ennustaa. Tehokytkimen mineraaliöljy kuitenkin heikentää paloja ja ympäristöturvallisuutta, joka esterioöljyjen käytöllä saavutetaan, joten VACUTAP®-käämikytkin on Fingridin tarpeisiin parempi vaihtoehto. Tyhjiöeristeiset käämikytkimet ovat jo nykyisin vaatimuksena uusille kantaverkon muuntajille.

Käämikytkimen käytölle on asetettu lämpötilarajat, sillä eristeenä käytettävän öljyn viskositeetin vaihtelu voi vaikuttaa käämikytkimen liikkuvien osien toimintaan. Esimerkiksi käämikytkimen valitsin sijaitsee muuntajalaatikon öljyssä, jolloin öljyn ominaisuudet vaikuttavat sen toimintaan. Tyypillisesti käämikytkintä voidaan käyttää lämpötilavälillä  $-25$ – $125$  °C, mutta esterioöljyjen korkeammasta viskositeetista johtuen rajoja joudutaan todennäköisesti muuttamaan. Lämpötilan pudotessa käämikytkimen käyttörajan alle käämikytkin tulee lukita, mutta muuntajaa voidaan silti pitää kuormitettuna.

Esterioöljyjen heikomman sähkölujuuden vuoksi esterimuuntajaan tulee mahdollisesti valita jännitetasoltaan tyypillisesti käytettyä suurempi käämikytkin, jotta sen kestävyys voidaan taata. Vaihtoehtoisesti kytkimen käämirakenne voidaan suunnitella hieman poikkeavaksi. Käämikytkimen suunnitteluprosessi tehdään yhdessä käämikytkinvalmistajan, muuntajavalmistajan ja muuntajan tilaajan kanssa, jotta kaikki suunnittelukriteerit saadaan otettua huomioon. Käämikytkimen materiaalivalinnat on myös tehtävä yhteensopivaksi esterioöljyjen kanssa. [54]

Koska vaihtoehtoisilla öljyillä eristettyjä läpivientejä ei vielä ole kehitetty, on esterimuuntajassa käytettävä kalliimpia kuivaeristeisiä läpivientejä. Tämä ei kuitenkaan tuota Fingridille ongelmaa, sillä kuivaeristeiset läpiviennit ovat jo nykyään vaatimuksena kantaverkon uusimmille muuntajille. Myös Buchholz-relettä voidaan käyttää esterimuuntajassa, mutta sen hälytysrajat on ohjelmoitava esterioöljyille sopivaksi. Esterimuuntajan paisuntasäiliössä suositellaan käytettäväksi kumipussia, jotta kosteus ja happi eivät pääse muuntajaan. Kumipussi on nykyään käytössä uusissa kantaverkon muuntajissa, joten senkään vaatiminen ei muodosta Fingridille ongelmaa. Siemensin asiantuntijoiden mukaan esterioöljyt eivät vaadi jatkuva-aikaista kuivausta niiden korkean veden kyllästyspisteen vuoksi, mutta mikäli öljyn kosteuspitoisuus nousee merkittävästi, voi kuivaus olla tarpeellista. [5] [50]

### 6.3 Käyttö Suomen ilmasto-olosuhteissa

Suurin haaste esterioöljyeristeisen muuntajan käyttöönotossa Suomen kantaverkossa on Suomen kylmät ilmasto-olosuhteet ja niistä johtuva esterien korkea viskositeetti. Muuntajan ollessa käytössä viskositeettiongelma on vähäinen, sillä muuntajan normaaleissa käyttölämpötiloissa esterien viskositeetti on lähellä perinteisesti käytettävien mineraaliöljyjen viskositeettia. Ongelma syntyy kuitenkin muuntajien käyttökeskeytystapauksissa, jolloin öljy pääsee viilenemään ja saattaa kylmissä ulkolämpötilaolosuhteissa jopa jäähmettyä. Käytännössä öljyn jäähmettyminen tapahtuu kuitenkin niin hitaasti, että se muodostuu ongelmaksi vain useamman päivän kestävässä keskeytyksissä.

Öljyn kylmeneminen vaikuttaa muuntajan hot spot –lämpötiloihin ja muuntajalaatikon sisäiseen paineeseen. Jos muuntajan öljy on jähmeä muuntajan ulkoreunoilla sekä paisuntasäiliössä ja radiaattoreissa, voi jähmeä öljy toimia tulppana käämien lähellä olevan

lämpimämmän öljyn kierrolle, minkä johdosta paine muuntajalaatikon sisällä saattaa kasvaa huomattavan suureksi.

Kantaverkon suurjännitemuuntajat sijaitsevat ulkona, missä lämpötila voi pudota hyvin alhaiseksi. Suomessa talven keskilämpötila vuosina 1981–2010 oli Helsingissä mitattuna  $-3,5\text{ °C}$  ja Sodankylässä mitattuna  $-12,6\text{ °C}$ . Viiden edellisen talven kylmin mitattu lämpötila on ollut keskimäärin  $-35,2\text{ °C}$ , joista kylmin arvo  $-41,7\text{ °C}$  mitattiin Muoniossa 5.1.2017. Suomen kaikkien aikojen alin lämpötila  $-51,5\text{ °C}$  mitattiin Kittilässä 29.1.1999. [55] Fingridin muuntajien hankintavaatimuksissa ulkolämpötilan vaihteluväliksi mainitaan  $-40 - 40\text{ °C}$ . Muuntajan tiivisteiden, pumppujen ja muiden lisälaitteiden tulee määrittelyjen mukaan kuitenkin kestää  $-50\text{ °C}$ :n ulkolämpötila. [18]

Synteettisen esterin Midel 7131:n tuotetiedoissa sen jähmettymispisteeksi on ilmoitettu  $-56\text{ °C}$ . Käytännössä sen viskositeetti suurenee kuitenkin lämpötilan laskiessa niin voimakkaasti, että jo tätä korkeammissakin lämpötiloissa se ei enää kykene virtaamaan muuntajan jäähdytysjärjestelmän läpi. Koska luonnollisilla estereillä jähmettymispisteet ovat vielä  $10-20\text{ °C}$  Midel 7131:tä korkeampia, ne soveltuvat vielä huonommin käytettäväksi kantaverkon muuntajien jäähdytysnesteinä. Siemensin asiantuntijat suosittelevat Suomeen hankittavaksi nimenomaan synteettisellä esterillä täytettävän muuntajan [50]. Öljylaboratorio VPdiagnosen asiantuntija suhtautuu kriittisesti esterimuuntajan sijoittamiseen ulkona sijaitsevalle sähköasemalle Suomen olosuhteissa, mutta pitää synteettistä esterä luonnollista esterä parempana vaihtoehtona, mikäli muuntaja hankitaan [56].

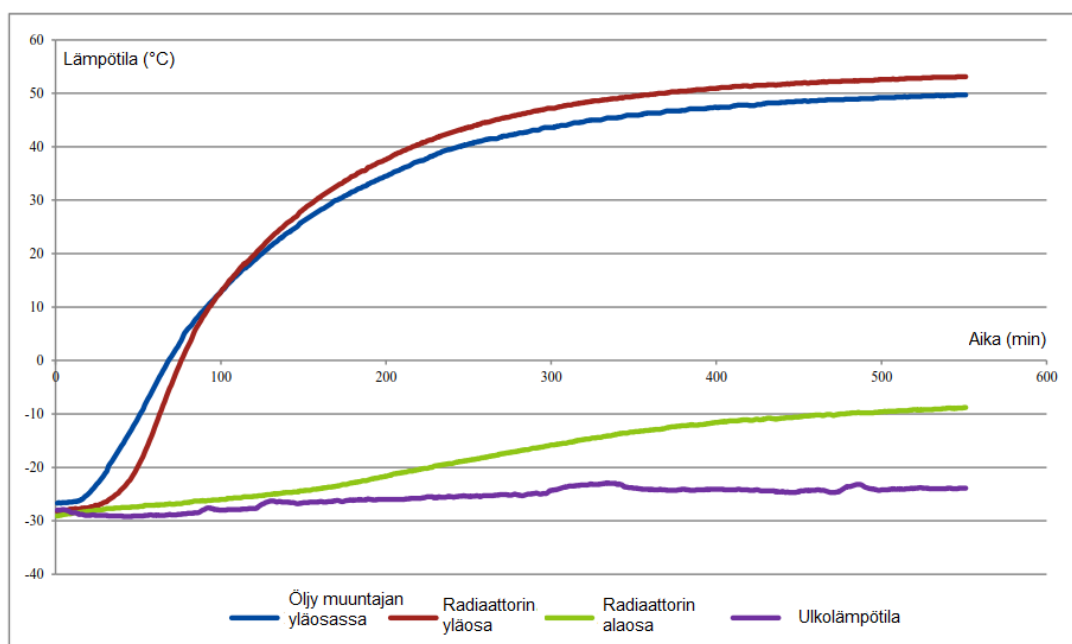
Esterimuuntajien käytöstä alhaisissa lämpötiloissa on julkaistu melko vähän tutkimustuloksia. Siemens on testannut synteettisen esterimuuntajan toimintaa yksivaiheisella 15 MVA säästömuuntajalla lämpötiloissa  $-50 - -30\text{ °C}$ . Testissä ei otettu kantaa muuntajan kylmäkäynnistykseen, vaan testattiin muuntajan toimintaa normaalissa käyttötilanteessa. Muuntajaa testattiin eri kuormituksilla ONAN- ja ONAF-jäähdytyksillä. Testissä puolet muuntajalaatikon seinistä ja katosta on eristetty, jotta lämmönsiirto muuntajan seinissä vähenisi ja radiaattorin merkitys jäähdytyksessä korostuisi. Tällöin testimuuntaja on paremmin verrattavissa myös suuremman kokoluokan muuntajiin. [57] Taulukossa 9 on esitetty testissä mitatut muuntajan öljyn lämpötilat 100 % kuormituksella eri ulkolämpötiloissa.

**Taulukko 9** Öljyn lämpötilat ONAN ja ONAF jäähdytyksellä [57].

	$-40\text{ °C}$			$-30\text{ °C}$		
	ONAN	ONAF	$\Delta$	ONAN	ONAF	$\Delta$
Öljyn lämpötilan nousu muuntajalaatikon yläosassa	106,7	123,9	+17,2	92,7	102,2	+9,5
Keskimääräinen lämpötilan nousu	68	92,5	+24,5	51,7	59	+7,3
Öljyn lämpötilan nousu muuntajalaatikon alaosassa	29,4	61	+31,6	10,7	15,8	+5,1

Taulukosta nähdään, että lämpötilat muuntajan sisällä nousevat, kun ulkolämpötila laskee. Lämpötilojen nousua selitettiin sillä, että öljy ei virtaa radiaattorin kaikkien osien läpi ja näin öljyn jäähdytyspinta-ala pienenee. Myös radiaattorin tuulettimien käytön huomattiin nostavan lämpötiloja muuntajan sisällä. Alhaisissa ulkolämpötiloissa käytettävän esterimuuntajan jäähdytys on siis suunniteltava niin, että radiaattorin tuulettimet eivät aina mene automaattisesti päälle kuormituksen noustessa tietyn rajan yli. Tutkimuksessa ei oltu mitattu lainkaan muuntajan hot spot –lämpötiloja, joista olisi saanut hyödyllistä lisätietoa muuntajan toiminnasta.

CG Power Systems Belgium on testannut synteettisellä esterillä täytetyn tuulivoimalakäyttöön tarkoitetun jakelumuuntajan lämpökäyttäytymistä kylmäkäynnistystilanteissa, kun ulkolämpötila on  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Testattu muuntaja on nimellistehoaltaan 5,5 MVA ja nimellisjännitteeltään 33kV/690V. Testissä muuntaja ja ympäröivä ilma jäähdytettiin ensin lämpötilaan  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minkä jälkeen muuntaja käynnistettiin täydellä kuormalla. Lämpötilan muuttumista muuntajan yläosassa, radiaattorin ylä- ja alaosa sekä muuntajan ulkopuolella mitattiin käynnistyksen jälkeen. Lämpötilamittauksen tulokset on esitetty kuvassa 19.

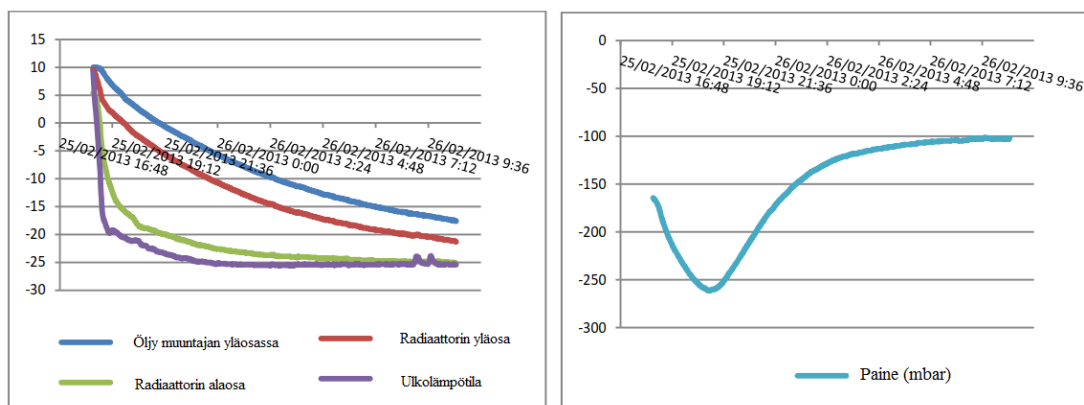


**Kuva 19** 5,5 MVA muuntajan kylmäkäynnistys lämpötilassa  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Muokattu lähteestä [48].

Kokeessa öljyn lämpötila muuntajan yläosassa alkoi kuvan mukaisesti nousta 15 min kulluttua käynnistyksestä. Lämpötila radiaattorin yläosassa alkoi nousta, kun käynnistyksestä oli kulunut 25 min. Tästä huomattiin, että synteettinen esteri ei ala kiertää jäähdytysjärjestelmässä välittömästi muuntajan käynnistyksen jälkeen. Testijulkaisussa lämpötilakuvaajaa verrattiin vastaavan luonnollisella esterillä eristetylle muuntajalle tehdyn kylmäkäynnistystestin [58] tuloksiin. Vertailun tuloksena pääteltiin, että synteettinen esteri on  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa vielä tarpeeksi juoksevaa, jotta syntyvä häviölämpö pääsee

kulkeutumaan pois käämeiltä. Lämpötilat eivät myöskään missään vaiheessa testiä ylittäneet sallittuja arvoja.

Kokeen yhteydessä mitattiin myös muuntajasäiliön sisäistä painetta. Painetta mitattiin jäähdytettäessä muuntaja lämpötilaan  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 20.



**Kuva 20** Muuntajalaatikon paineen muutos lämpötilan laskiessa. Muokattu lähteestä [48].

Muuntajalaatikkoon syntyi esterin ja muuntajan sisällä olevan kaasutyynyn lämpötilan laskusta johtuvan kutistumisen vuoksi alipaine. Koska kaasujen liukenevuus öljyyn on riippuvainen lämpötilasta, siirtyvät esteriin liuenneet kaasut öljyn yläpuoliseen kaasutilaan muuntajan viilenneenä riittävästi. Tällöin paine laatikon sisällä alkaa nousta. Alipaine ei missään vaiheessa kasvanut liian suureksi ja muuntajasäiliö pysyi ehjänä. [48] Testin muuntajan paineen muutos ei ole verrattavissa kantaverkon muuntajiin, sillä kantaverkon muuntajissa öljyn lämpölaajenemisen mahdollistamiseksi käytetään paisuntasäiliötä eikä kaasutyynyä, jolloin alipaineen sijasta vaarana on paineen nousu.

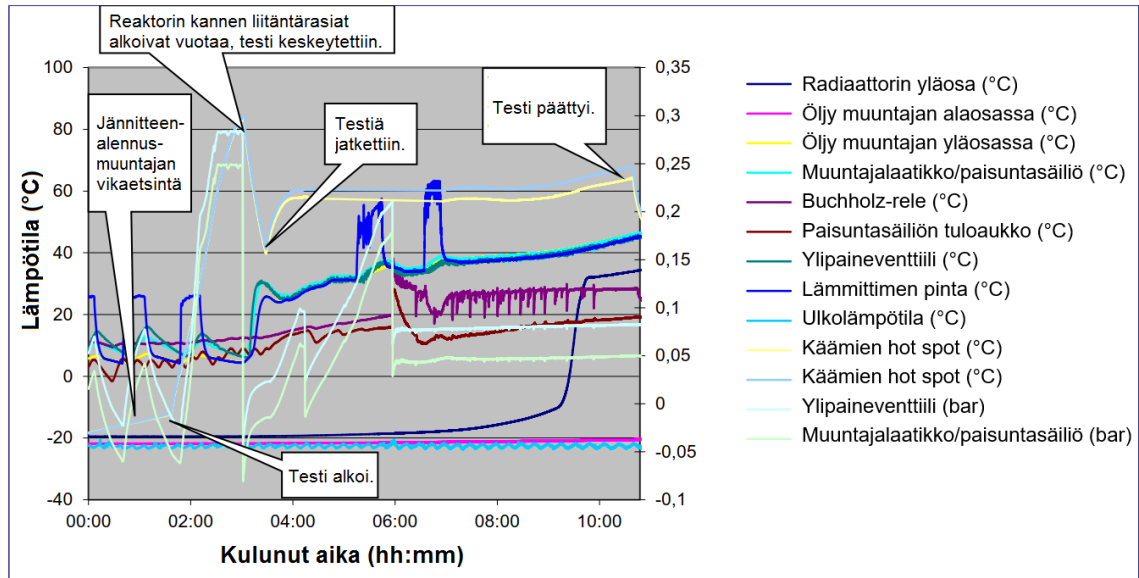
Testatun 5,5 MVA muuntajan lämpötilakäyttäytyminen ei ole suoraan verrattavissa kantaverkon 400 MVA suurjännitemuuntajiin. Testissä kuitenkin selviää, että jopa  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa synteettinen esteri alkaa virrata lämpöhäviöiden vaikutuksesta jo noin 15 min kuluttua käynnistyksestä. Testatussa muuntajassa lämmönsiirto tapahtui ainoastaan luonnollisen konvektion avulla ilman avustavaa pumppujärjestelmää. Muuntajassa on myös käytetty kiinteänä eristeenä korkean lämmönsietokyvyn Nomex®-materiaalia [59], joten muuntajan käynnistys täydellä kuormituksella ei ole ongelma kiinteän eristeen ylikuumenemisen kannalta. Kantaverkkoon hankittavassa muuntajassa kuitenkin käytettäisiin käämeissä todennäköisesti halvempaa selluloosaeristystä, joka ei kestä yhtä suuria lämpötiloja kuin Nomex®. Fingridin muuntajamäärittelyt myös vaativat, että kantaverkon muuntajien tulee toimia vielä  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  tutkimuksen testiolosuhteita kylmemmässä lämpötilassa, jolloin synteettinen esteri on vielä huomattavasti jähmeämpää.

Muuntajavalmistaja Siemensin asiantuntijoiden mukaan synteettisellä esterillä täytetyn muuntajan kylmäkäynnistys ei ole Suomen talviolosuhteissakaan kuitenkaan ongelma.

Siemens on aikaisemmin toimittanut esterimuuntajia kylmiin ilmasto-olosuhteisiin esimerkiksi Siperiaan. Yrityksen edustajien mukaan esteriöljyn alhaisen lämpötilan ongelmat saadaan korjattua jäähdytysjärjestelmään liitetyillä öljyn kiertoa avustavilla pumpuilla. Jos esteri on ehtinyt jähmettyä liikaa, muuntajaa voidaan ensin pitää tyhjäkäynnillä, jolloin tyhjäkäyntihäviöt lämmittävät öljyä. Vaihtoehtoisesti muuntaja voidaan aluksi käynnistää nimellistä pienemmällä kuormituksella. Kun öljy on muuttunut hieman juoksevaksi, käynnistetään öljypumput, jolloin ne pakottavat öljyn kiertämään järjestelmässä. Siemensin Siperiaan toimittamat muuntajat ovat kuitenkin kantaverkon muuntajia pienempiä ja niiden jäähdytystapa on ONAN, joten käyttökokemusta tällaisista pumpuista ei vielä ole. [50]

Järjestelmään voidaan lisätä öljyn virtausnopeutta seuraava sensori, joka käynnistää pumput automaattisesti. Kun öljy pääsee kiertämään jäähdytysjärjestelmän putkissa, muuntajan kuormitusta voidaan lisätä. Asiantuntijoiden mukaan pumppulaitteisto suunnitellaan aina muuntajakohteisesti ja mikäli tyhjäkäyntihäviöt ja pumput eivät riitä takaamaan öljyn kiertoa, voidaan jäähdytysjärjestelmään lisätä erilliset lämmittimet. Lämmittimet tulisi ensisijaisesti asentaa paisuntasäiliöön ja radiaattoreihin, joiden putkissa jähmettynyt öljy toimii tulppana ja estää öljyn kierron. Käytännössä muuntajan kuormituksen osittainen lisääminen kantaverkossa on hyvin vaikeaa ja tyhjäkäyntihäviöt ovat niin pienet, etteivät ne yksinään riitä lämmittämään muuntajan öljyä. Tällöin muuntajaöljyn esilämmitys erillisillä lämmittimillä ja muuntajan käynnistys nimellisellä kuormalla saattaa olla ainoa vaihtoehto kylmäkäynnistykseen. [50]

Muuntajavalmistaja ABB on testannut lämmittimien käyttömahdollisuutta luonnollisella esterillä eristetyn reaktorin kylmäkäynnistyksessä lämpötilassa  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin esteri on täysin jähmettynyt. Testissä käytettiin paisuntasäiliöllistä nimellistehoaltaan 395 kVA:n reaktoria, jossa paisuntasäiliöön johtaviin putkiin ja paisuntasäiliön ympärille asennettiin lämmittimet. Luonnollisen esterin toiminta reaktorin kylmäkäynnistyksessä on vertailtavissa muuntajan kylmäkäynnistystilanteeseen. Lämmittimet käynnistettiin ennen reaktorin käynnistystä, jotta putkissa oleva jähmettynyt öljy ei jäisi tulpaksi estämään öljyn virtaamista paisuntasäiliöön ja paine muuntajalaatikon sisällä ei kasvaisi liian suureksi. Kuvassa 20 esitetystä alipaineen muodostumisesta poiketen tässä testissä vaarana oli paineen nousu, sillä kaasutyynyn sijasta öljyn lämpölaajenemisaikana oli paisuntasäiliö. Testiaika alkoi reaktorin käynnistyksestä. Reaktori käynnistettiin täydellä kuormituksella. Sensorien mittaustulokset testiajalta on esitetty kuvassa 21.



**Kuva 21** Reaktorin kylmäkäynnistystestin tulokset. Muokattu lähteestä [60].

Kuvassa huomataan paineen nousua ja laskua, mikä selittyy sillä, että öljy lämpeni hitaammin paisuntasäiliössä kuin reaktorin sisällä. Paine ei kuitenkaan missään vaiheessa kasvanut liian suureksi. Reaktorin lämpötilat eivät myöskään nousseet missään vaiheessa testiä liian korkeiksi. Testin aikana öljy ei kiertänyt radioattorissa, mutta virtasi kuitenkin paisuntasäiliöön, mistä voidaan päätellä lämmittimen olleen toimiva ratkaisu. [60] Mikäli lämmittimet lisättäisiin myös radioattorin putkiin, pääsisi öljy virtaamaan myös radioattorille.

Julkaistujen kylmäkäynnistystestitulosten ja Siemensin asiantuntijalausuntojen perusteella voidaan päätellä esterimuuntajan kylmäkäynnistystestien olevan mahdollista myös Suomen talviolosuhteissa käyttökeskeytyksen jälkeen. Tarvittavaa pumppu- ja lämmityslaitteistoa ei kuitenkaan voi mitoittaa ilman tarkkaa mallinnusta juuri kantaverkon vaatimusten mukaan rakennetun muuntajan lämpökäyttäytymisestä. Ennen esterimuuntajan hankkimista kantaverkkoon tällainen muuntajakohtainen testi on tehtävä. Myös paineen nousua kantaverkkoon sopivan muuntajan kylmäkäynnistystilanteessa tulee tutkia. Paineen kasvaminen voi pahimmassa tapauksessa rikkoa muuntajan käämityksen ja muuntajalaatikon.

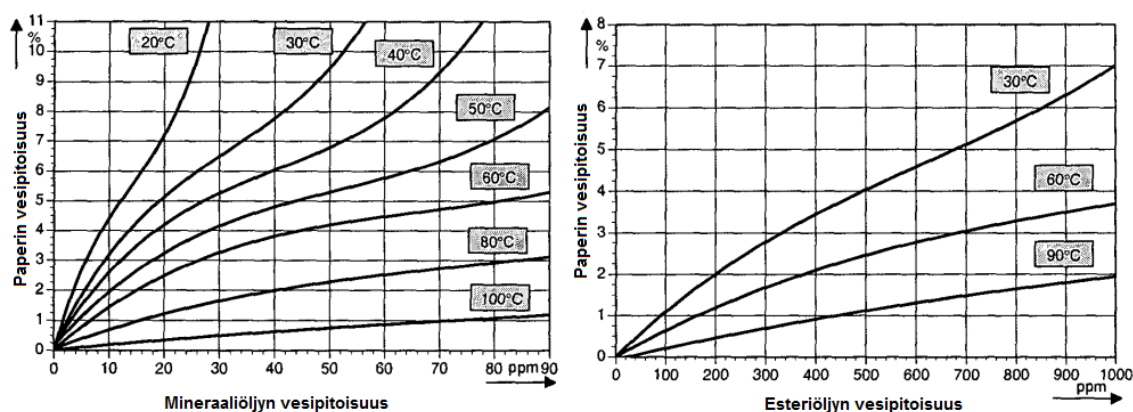


## 7. ESTERIMUUNTAJAN ELINKAAREN HALLINTA

Esterimuuntajan elinkaaren hallinta voidaan toteuttaa pääasiassa samanlaisena kuin perinteisen mineraaliöljymuuntajan. Esteriöljyjen ominaisuuksista ja niistä johtuvista muuntajan rakenteen muutoksista johtuen joitain poikkeuksia pitää kuitenkin ottaa huomioon.

### 7.1 Ikääntyminen

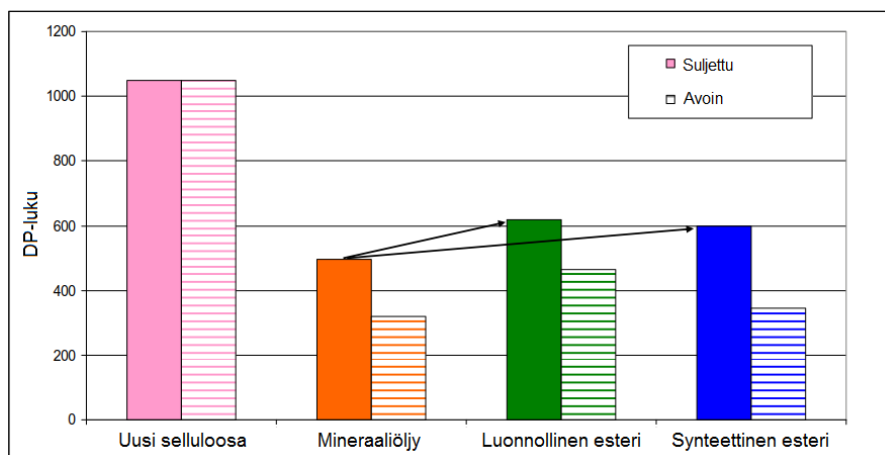
Esterien mineraaliöljyjä polaarisemmasta rakenteesta johtuen suurempi määrä paperin ja öljyn hajoamistuotteena syntyneestä tai muuntajalaatikon ulkopuolelta laatikon sisään päätyneestä kosteudesta sitoutuu esterioöljyyn sen sijaan, että se imeytyisi paperieristeesseen. [5] Veden jakautuminen paperin ja öljyn välillä eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 22.



**Kuva 22** Kosteuden jakautuminen öljyn ja paperin välillä [61].

Kuvasta nähdään, että esimerkiksi 60 °C:ssa mineraaliöljyn vesipitoisuuden ollessa 20 ppm, on paperieristeen vesipitoisuus jo 2,5 %, mikä on jo melko paljon. Vastaavasti 60 °C:ssa esterillä impregnoidun paperieristeen kosteuspitoisuus on vain 1,2 % esterin vesipitoisuuden ollessa 200 ppm. Esteriöljyt ovat siis huomattavasti mineraaliöljyä parempi valinta paperin kuivana pitämiseen.

Kuten luvussa 3.1 todettiin, kosteus nopeuttaa paperieristeen vanhenemista huomattavasti. Paperieristeen vanhenemisnopeutta voidaan mitata erilaisten kiihdytettyjen ikääntymistestien avulla. Erään ikääntymistestin tulokset on esitetty kuvassa 23. Testissä mitattiin paperieristeen ikääntymistä upotettuna mineraaliöljyyn, luonnolliseen esteriin ja synteettiseen esteriin. Ikääntymistä mitattiin paperin DP-luvun avulla.



**Kuva 23** Paperieristeen ikääntymistestin tulokset [6].

Testissä paperi-öljyeristenäytteitä on ikäännytetty kuukausi 140 °C:ssa sekä ympäristöltä suljetuissa, että avoimissa testiolosuhteissa. Kuvaajasta nähdään, että ympäristön ja sitä kautta hapen kanssa kosketuksissa olleen paperinäytteen DP-luku on jokaisen öljyn tapauksessa pienempi kuin suljetussa ympäristössä olleiden näytteiden. Tästä voidaan päätellä hapen nopeuttavan paperieristeen vanhenemista. Mineraaliöljyyn upotettu paperi on vanhentunut eniten ja luonnolliseen esteriiin upotettu paperi vähiten. Suljetussa astiassa tehdyssä kokeessa synteettisen ja luonnollisen esterin tulokset eivät kuitenkaan juurikaan eroa toisistaan.

Kokeessa ei ole mitattu itse öljyn ikääntymistä, mikä vaikuttaisi erityisesti luonnollisen esterin menestykseen avoimen ympäristön kokeessa. Mineraaliöljy ja synteettinen esteri puolestaan kestävät hapettumista huomattavasti paremmin. Testistä voidaan kuitenkin päätellä esterioöljyjen käytön pidentävän paperieristeen ikää. Siemensin asiantuntijoiden arvion mukaan esterimuuntajan elinikä voi olla jopa kaksinkertainen mineraaliöljymuuntajaan verrattuna, mikäli muuntajia käytetään samoilla lämpötilarajoituksilla [50].

Käytännössä muuntajan käyttöikää on kuitenkin hyvin vaikea arvioida. Koska paperieriste on yleensä ollut muuntajan käyttöiän määräävä mittari, ei muuntajan muiden osien ikääntymisestä ole olemassa varmaa tietoa. Toisaalta muuntajan lisälaitteet on suhteellisen helppo vaihtaa muuten toimivaan muuntajaan, mikäli odotettuja käyttövuosia on vielä jäljellä niin monta, että osien uusiminen on järkevää.

## 7.2 Kunnossapito

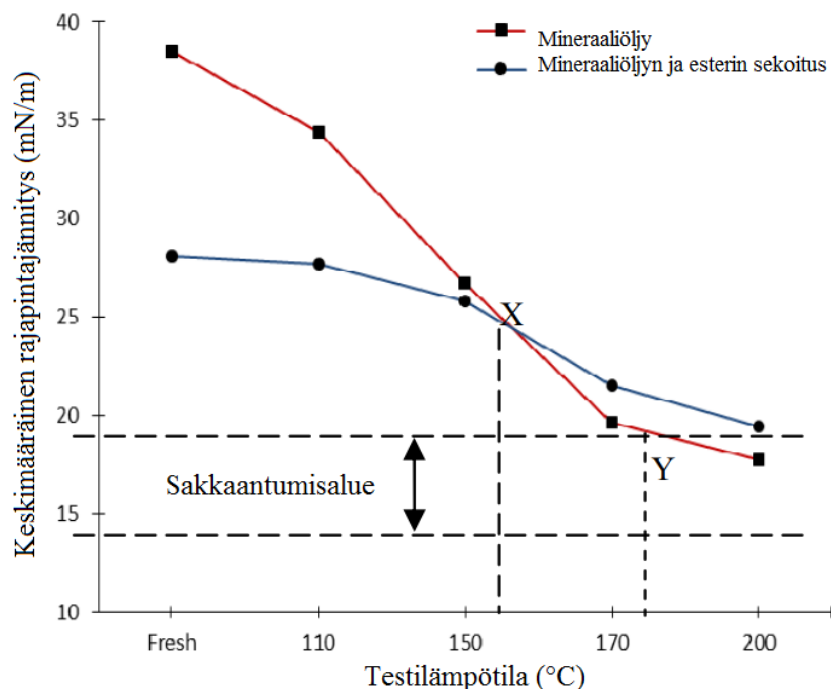
Esterioöljymuuntajan kunnossapito voidaan toteuttaa pääasiassa samalla tavalla kuin mineraaliöljymuuntajan kunnossapito. Esterioöljyjen käyttö ei vaikuta muuntajan lisäosien huoltotarpeeseen, joten esimerkiksi läpivientien ja käämikytkimen kunto tulee tutkia normaalilla aikataululla. Myös muuntajalaatikon ja tiivistesten kunto on tärkeää tutkia riittävän usein, sillä vuodon myötä muuntajaan pääsee ilman mukana kosteutta ja happea, ja

etenkin luonnolliset esterit ovat alttiita hapettumiselle. Muuntajan aktiiviosa pysyy esterimuuntajassa paremmassa kunnossa esteröljyjen paperin vanhenemista vähentävien ominaisuuksien vuoksi. Tämän vuoksi esterimuuntajalle ei mahdollisesti tarvitse suorittaa laajaa perushuoltoa kertaakaan sen eliniän aikana. Esterimuuntajan aktiiviosan pidemmän eliniän vuoksi muuntajan apulaitteille saattaa olla tarpeellista tehdä huoltoja nykyistä enemmän, sillä muuntaja on käytössä pidempään. [50]

Siemensin asiantuntijoiden mukaan myös tarvittava öljynäytteenottoväli voisi esterimuuntajalla olla pidempi, koska muuntaja vanhenee hitaammin [50]. Käytännössä kuitenkin etenkin ensimmäisen kantaverkkoon hankittavan, pioneerina toimivan esterimuuntajan kohdalla näytteenottoväli olisi jopa nykyistä tiheämpi, jotta uudenlaista tekniikkaa hyödyntävästä muuntajasta saataisiin mahdollisimman paljon tietoa jatkokehitykseen.

Mineraaliöljyn ja esterien öljyanalyysit voidaan pääasiassa suorittaa keskenään samoilla menetelmillä, mutta niissä tutkitaan osittain eri asioita. Esimerkiksi mineraaliöljyistä mitattavaa happolukua ei voida luotettavasti tutkia esteröljyjen kohdalla, sillä niissä tapahtuu hapettumisen lisäksi hydrolyysireaktiota, jossa esteri hajoaa takaisin lähtöaineikseen. Esterien happopitoisuus voi siis olla huomattavasti mineraaliöljyä korkeampi. [50]

Esteröljyjen rajapintajännitys ei myöskään ole yhtä hyvä öljyn kunnon mittari, sillä se pienenee mineraaliöljyyn verrattuna hitaammin. Rajapintajännityksen muutosta voidaan mitata nopeutetun lämpötilarastitustestin avulla. Erään testin tulokset on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 24** Rajapintajännityksen muutos lämpörasituksen alla [31].

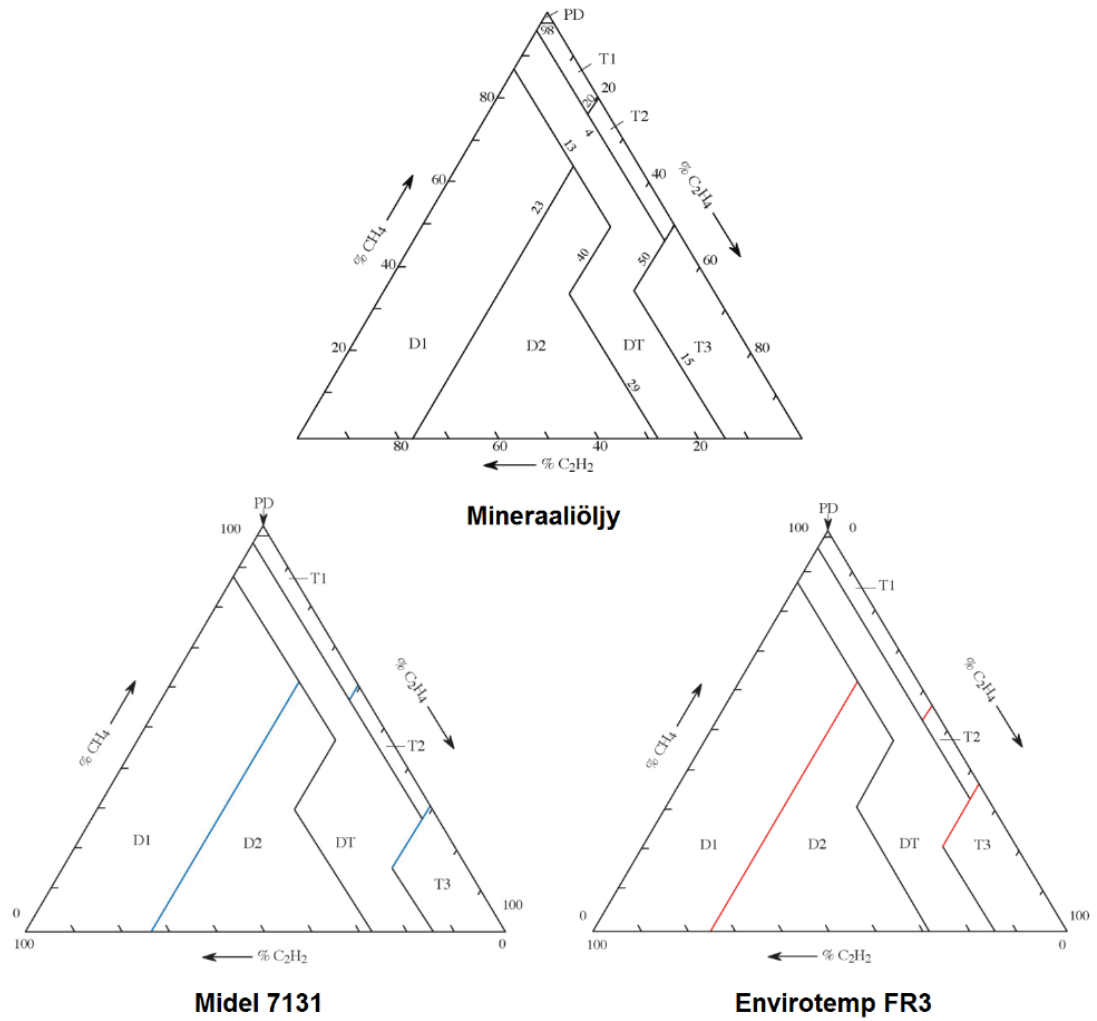
Testissä tutkittiin mineraaliöljyn sekä mineraaliöljyn ja synteettisen esterin sekoituksen rajapintajännitystä. Sekoituksessa oli 80 % mineraaliöljyä ja 20 % synteettistä esterä. Kuvasta nähdään, että mineraaliöljyn rajapintajännitys oli alun perin suurempi kuin öljyn sekoituksella. Mineraaliöljyn rajapintajännitys kuitenkin pieneni lämpötilarasituksen alla huomattavasti nopeammin. Tästä voidaan päätellä, että myös puhtaan esterin rajapintajännitys pienenee mineraaliöljyä hitaammin. Vaikka esterien rajapintajännitys ei ole suoraan verrattavissa mineraaliöljyn rajapintajännitykseen öljyn kunnon mittarina, saat-  
taa rajapintajännityksen mittaustulos olla kuitenkin käyttökelpoinen, mikäli testijakson kestoa pidennetään. [56] [50]

### 7.3 Liuenneiden kaasujen analyysi

Liuenneiden kaasujen analyysi voidaan toteuttaa esteröljyille pääasiassa samalla tavalla kuin mineraaliöljyille, mutta pieniä muutoksia tarvitaan. Kaasujen erotteluun öljystä voidaan käyttää kaikkia neljää standardissa IEC 60567 määriteltä kaasu-erottelumenetelmää. Esterien korkeamman viskositeetin vuoksi erotteluun tarvitaan kuitenkin hieman pidempi aika. Esterien kohdalla tarvittava aika on tyypillisesti 10–15 min kun mineraaliöljyillä erotteluun riittää 1–3 min. Headspace-menetelmän kalibrointivakiot myös poikkeavat estereillä jonkin verran mineraaliöljyjen vakioista. [62]

Vikatilanteissa tapahtuvasta kaasujen muodostuksesta mineraaliöljyissä on olemassa paljon tietoa lukuisten käytössä olevien muuntajien vikatilanteiden pohjalta. Esterimuuntajia on vielä käytössä niin vähän, että vastaavaa määrää tilastotietoa ei ole saatu kerättyä. Esteriöljyjen kaasu-  
muodostusta vikatilanteissa on kuitenkin saatu tutkittua altistamalla mineraali- ja esteröljyjä laboratoriossa samoille vikatilanteille ja tarkkailemalla tuloksia. Laboratoriossa tehtyjen kokeiden perusteella on huomattu, että mineraali- ja esteröljyissä muodostuvat vikakaasut ovat pääasiassa samoja. Vikakaasujen määrät ja keskinäiset suhteet kuitenkin poikkeavat jonkin verran toisistaan. Luonnollinen esteri esimerkiksi tuottaa normaaleissa käyttölämpötiloissa huomattavasti enemmän etaania ja vetyä kuin mineraaliöljy. [62]

Esterien vikakaasujen tutkimiseen on jo olemassa nämä poikkeavuudet huomioon ottavia analysointimenetelmiä. Esimerkiksi Duvalin kolmiot on jo kehitetty erikseen niin synteettiselle esterille Midel 7131 kuin luonnolliselle esterille Envirotemp FR3. Nämä Duvalin kolmiot on esitetty kuvassa 25.



**Kuva 25** Duvalin kolmiot eri öljyalaaduissa syntyneiden vikakaasujen tutkimiseen [29].

Kuvasta huomataan, että vika-alueiden rajat ovat jokaiselle öljytyypille lähes samat. Midel 7131:n ja Envirotemp FR3:n kohdalla jotkin rajat poikkeavat hieman mineraaliöljyn Duvalin kolmiosta. Nämä rajat riippuvat kolmion oikealla sivulla esitetyn etyleenin määrästä.

## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUS

Fingridin omistamien suurjännitemuuntajien rakenne on muotoutunut vuosien kehitystyön tuloksena sellaiseksi kuin se nykyään on. Kehitystyöhön on panostettu suuresti, jotta kantaverkkoon saataisiin hankittua parhaiten sen tarpeisiin vastaavat muuntajaratkaisut. Moni kantaverkon muuntajissa nykyään vaadituista ominaisuuksista, esimerkiksi kuivariesteiset läpiviennit, on kuitenkin sellaisenaan esterimuuntajiinkin sopivia. Tutkimus esterioöljyjen käyttöönottomahdollisuuksista kantaverkon muuntajiin sopii siis hyvin jatkoksi Fingridin muuntajien kehitystyöhön. Taulukkoon 10 on kerätty esterimuuntajan ja perinteisen mineraaliöljymuuntajan edut ja haasteet työssä käsiteltyjen aihepiirien osalta.

*Taulukko 10 Mineraaliöljy- ja esterimuuntajan edut ja haasteet.*

Edut	Haasteet
<b>Mineraaliöljymuuntaja</b>	
Toiminta alhaisissa lämpötiloissa	Huono palo- ja ympäristöturvallisuus
Pienet häviöt	
Paljon käyttökokemukseen perustuvaa tietoa saatavilla	
<b>Esterimuuntaja</b>	
Hyvä palo- ja ympäristöturvallisuus	Käynnistys ja toiminta alhaisissa lämpötiloissa
Pidempi elinikä	Suuremmat häviöt, jos nykyisten kantaverkon muuntajien kokoinen
	Vähän käyttökokemukseen perustuvaa tietoa saatavilla

Työssä kerätyn aineiston perusteella esterieristeisen suurjännitemuuntajan hankkiminen kantaverkkoon on teknisesti mahdollista. Vaikka esterimuuntaja on joiltain ominaisuuksiltaan perinteistä muuntajaa haasteellisempi vaihtoehto käytettäväksi kantaverkossa, voidaan nämä haasteet ratkaista suunnittelemalla muuntaja huolellisesti esterioöljyjen ominaisuudet huomioon ottaen. Ensimmäiselle kantaverkkoon hankittavalle esterimuuntajalle tulisi myös vaatia normaalia pitempi takuu-aika, sillä uuden tekniikan toiminnasta ei voida varmistua ennen sen kokeilemistä käytännössä.

Aineistoa kerätessä esiin nousi joitain aiheita, joita ei vielä esterimuuntajiin liittyen ole tutkittu. VPdiagnosen asiantuntijan mukaan esterioöljyjen korkeamman vesipitoisuuden mahdollinen vaikutus öljyn viskositeettiin tulee ottaa huomioon. Asiantuntijan mukaan veden sitoutumisesta johtuva esterin molekyylien koon kasvu saattaa kasvattaa esterien jo ennestään korkeaa viskositeettia. Vesipitoisuuden vaikutuksesta viskositeettiin ei kuitenkaan ole julkaistu tutkimustietoa. Siemensen asiantuntijoiden mukaan vesipitoisuuden ei pitäisi vaikuttaa esterin viskositeettiin, mutta aihetta tulee tutkia lisää. [56] [50]

Toinen VPdiagnosen asiantuntijan mainitsema tutkimusta kaipaava asia on muuntajan kupari- ja hopeaosien reagoiminen esteröilyn kanssa. Mikäli esteröintiin liukenee muuntajasta metallia, ei se ole enää täysin biohajoavaa. Fingridin muuntajissa öljy ei nykyisin ole käytännössä kosketuksissa kuparin kanssa, sillä Fingridin kaikkien uusimpien muuntajien käämien materiaali on emaloitua kuparia. Siemensin asiantuntijoiden mukaan kuparin liukeneminen esteröintiin ei ole ongelma. Käämikytkimen valitsimessa on kuitenkin hopeaa, joka on kosketuksissa muuntajan öljyn kanssa, ja jonka liukenemista esteröilyyn ei ole tutkittu. M&I Materialsin edustajan mukaan hopean liukeneminen öljyyn ei ole ongelma. Aiheesta olisi kuitenkin hyvä saada tutkimustuloksia myös puolueettomalta taholta. [56] [43] [50]

Vaikka olemassa olevat tutkimukset osoittavat esterimuuntajan kylmäkäynnistyksen olevan mahdollista myös öljyn jähmetyttyä, vaatii aihe lisätutkimuksia. Nykyiset tutkimukset on tehty kantaverkon vaatimuksia pienemmän kokoluokan muuntajille. Eri kokoisten muuntajien rakenne poikkeaa jonkin verran toisistaan, minkä vuoksi öljyn käyttö testatuissa muuntajissa ei ole suoraan verrattavissa suurempiin muuntajiin. Lämpötila ja paine muuntajalaatikossa voivat kylmäkäynnistystilanteessa nousta niin suuriksi, että muuntaja vikaantuu. Tämän vuoksi aihetta on tutkittava vielä lisää ennen kuin kantaverkkoon voidaan hankkia esterimuuntaja. Myös esterimuuntajan käytön mahdollista rajoittamista kylmissä lämpöolosuhteissa täytyy tutkia. Lisäksi pumppujen toiminta alle  $-30\text{ °C}$ :ssa tulee varmistaa.

Suurin osa saatavilla olevista esteröilyihin liittyvistä tutkimustuloksista on öljy- tai muuntajavalmistajien julkaisemia. Tämän vuoksi myös sellaisista esterimuuntajiin liittyvistä osa-alueista, joista on jo nykyään saatavilla tutkimustietoa, olisi hyvä saada myös jonkin puolueettoman tahon julkaisemia tutkimustuloksia.

## 9. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin mahdollisuutta hankkia kantaverkkoon esterieristeinen suurjännitemuuntaja. Esterimuuntajaa tutkittiin ympäristö- ja paloturvallisuutta lisäävänä vaihtoehtona perinteiselle mineraaliöljymuuntajalle. Esterimuuntajan eroja perinteiseen muuntajaan selvitettiin kirjallisuuden ja asiantuntijahaastattelujen avulla. Työn tavoitteena oli selvittää, onko kantaverkon vaatimuksiin sopiva esterieristeinen muuntaja mahdollista rakentaa ja miten esterin korkeasta viskositeetista aiheutuvat haasteet saataisiin ratkaistua kylmäkäynnistystilanteessa.

Työssä selvitettiin, miten esterieristeisen suurjännitemuuntajan rakenne poikkeaa perinteisestä muuntajasta. Esteriöljyjen huonomman sähkölujuuden vuoksi muuntajaan vaaditaan useampi kerros kiinteää eristettä, kuten prespaania, mikä kasvattaa muuntajan ulkomittoja. Koska Fingridin muuntajat ovat jo fyysisiltä mitoiltaan Suomen rauta- ja maanteiden kuljetusaukon ylärajalla, ei esterimuuntajaa voi rakentaa niitä suuremmiksi. Tämän vuoksi esterimuuntajan aktiiviosa on suunniteltava hieman poikkeavaksi ja käämien virrantiheyttä on kasvatettava, mikä johtaa kuormitushäviöiden kasvuun.

Työssä todettiin, että esteriöljyjen korkea viskositeetti aiheuttaa haasteita esterimuuntajan käytölle alhaisissa ulkolämpötiloissa. Korkean viskositeetin vuoksi esteri ei välttämättä kierrä muuntajan jäähdytysjärjestelmässä ja muuntajan hot spot –lämpötilat sekä paine voivat kasvaa liian suuriksi. Ongelmia tulee etenkin tilanteessa, jossa muuntaja käynnistetään käyttökeskeytyksen jälkeen. Työssä kerätyn aineiston perusteella kylmäkäynnistys voidaan suorittaa muuntajaan liitettyjen erillisten pumppujen ja tarvittaessa lämmityslaitteiden avulla.

Työssä pohdittiin myös esterimuuntajan kunnossapidon mahdollisia eroavaisuuksia perinteisen muuntajan kunnossapitoon. Työssä todettiin, että kunnossapito voidaan molempien muuntajien kohdalla toteuttaa pääasiassa samalla tavalla, mutta esterimuuntajalla huoltovälit voivat olla pidempiä sen kestävämmän rakenteen vuoksi. Esterien öljyanalyysi voidaan myös toteuttaa perinteisillä menetelmillä, mutta mitattavat ominaisuudet poikkeavat jonkin verran mineraaliöljyistä.

Työssä kerätyn aineiston perusteella esterieristeisen suurjännitemuuntajan hankkiminen kantaverkkoon on mahdollista. Suurin osa nykyisestä esterimuuntajiin liittyvästä tutkimustiedosta on kuitenkin öljy- ja muuntajavalmistajien julkaisemaa. Aiheesta olisi hyvä saada tutkimustietoa myös puolueettomilta tahoilta. Kantaverkon vaatiman kokoluokan esterimuuntajan toimintaa alhaisissa lämpötiloissa ei myöskään ole testattu, vaan olemassa oleva tutkimustieto on kerätty pienistä muuntajista. Esterieristeisen suurjännitemuuntajan toimintaa kylmäkäynnistystilanteessa alhaisissa lämpötiloissa on testattava ennen kuin sellainen voidaan hankkia kantaverkkoon.



## Lähteet

- [1] ”Sähkömarkkinalaki”, 9.8.2013. [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>
- [2] Fingrid Oyj, Kantaverkon käsikirja, Helsinki: Fingrid, 2011.
- [3] T. Ojanen, Haastateltava, *Vanhempi asiantuntija*. [Haastattelu] 10.10.2017.
- [4] Cigre, ”Guide for Tranformer Fire Safety Practices”, Cigre, 2013.
- [5] Cigre, ”Experiences in Service with New Insulating Liquids”, 2010.
- [6] R. Fritsche, U. Rimmele, F. Trautmann ja M. Schäfer, ”Prototype 420 kV Power Transformer Using Natural Ester Dielectric Fluid”, 2014.
- [7] M&I Materials Ltd., ”First Midel 400kV Transformers for National Grid following Test Project”, M&I Materials Ltd., [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.mimaterials.com/news/first-midel-400kv-transformers-for-national-grid-following-test-project> [Haettu 18.10.2017].
- [8] M. J. Heathcote, *The J & P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer*, Newnes, 2007.
- [9] K. Nousiainen, *DEE-23000 Magneettipiirit ja muuntajat*, Tampere: Opetusmoniste, 2016.
- [10] Sam Dong, ”C.T.C. (Continuously Transposed Conductor)”, Sam Dong America, [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.samdongamerica.com/products/ctc-continuously-transposed-conductor> [Haettu 13.10.2017].
- [11] ABB Transmit Oy, *Power Transformer Construction*, Vaasa, 1995.
- [12] C. Krause, ”Power Transformer Insulation - History, Technology and Design”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 19, nro 6, ss. 1941–1947, 2012.
- [13] Nynas AB, *Transformer oil handbook - performing better by knowing more*, Nynas AB, 2010.

- [14] CelluForce, "Our Products: Cellulose Nanocrystals", [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.celluforce.com/en/products/cellulose-nanocrystals/> [Haettu 10.7.2017].
- [15] T. A. Prevost, "Degradation of Cellulose Insulation in Liquid-Filled Power Transformers", EHV-Weidmann Industries, Inc., 2005.
- [16] Weidmann Electrical Technology AG, "High temperature resistant paper solutions", Weidmann Electrical Technology AG, [Verkkosivu] Saatavissa: <https://www.weidmann-electrical.com/insulation-technology/paper/high-temperature/> [Haettu 13.10.2017].
- [17] VPdiagnose, Chemistry in cellulose/oil insulated apparatuses, Västerås: VPdiagnose, 2006.
- [18] Fingrid Oyj, *400 MVA muuntajan määrittelyt*, Sisäinen dokumentti, 2011.
- [19] IEC, *IEC 60076–2: Power Transformers Part 2: Temperature rise*, Geneve, 2011.
- [20] ABB, Service Handbook for Transformers, ABB, 2007.
- [21] P. S. Georgilakis, "Environmental cost of distribution transformer losses", *Applied Energy*, osa/vuosik. 88, nro 9, ss. 3146–3155, 2011.
- [22] W. G. Hurley ja W. H. Wolfle, *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., 2013.
- [23] M. Arshad ja S. M. Islam, "Significance of Cellulose Power Transformer Condition Assessment", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 18, nro 5, ss. 1591–1598, 2011.
- [24] Pyrocrat, "What is Pyrolysis?", [Verkkosivu] Saatavissa: <http://pyrolysisplant.com/what-is-pyrolysis/> [Haettu 10.8.2017].
- [25] Fingrid, "Ohjeistuswiki", [Verkkosivu] Saatavissa: Yhtiön sisäinen verkkosivu [Haettu 1.9.2017].
- [26] J. Faiz ja S. Milad, "Dissolved Gas Analysis Evaluation in Electric Power Transformers using Conventional Methods a Review", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 24, nro 2, ss. 1239–1248, 2017.

- [27] C. Perrier, M. Marugan ja A. Beroual, "DGA Comparison Between Ester and Mineral Oils", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 19, nro 5, ss. 1609–1614, 2012.
- [28] IEC, *IEC 60567: Oil-filled electrical equipment - Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases - Guidance*, IEC, 2005.
- [29] M. Duval, "The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, osa/vuosik. 24, nro 6, ss. 22–29, 2008.
- [30] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. Lakhiani ja A. Jhala, "A Review on Critical Evaluation of Natural Ester vis-a-vis Mineral Oil Insulating Liquid for Use in Transformers: Part 1", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 23, nro 2, ss. 873–880, 2016.
- [31] U. Mohan Rao, Y. R. Sood ja R. K. Jarial, "Performance Analysis of Alternate Liquid Dielectrics for Power Transformers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 23, nro 4, ss. 2475–2484, 2016.
- [32] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen ja V. Palva, *Suurjännitetekniikka*, Jyväskylä: Otatieto, 2003.
- [33] IEC, *IEC 60296 Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*, Geneve, 2012.
- [34] SDMyers, "Oxidation Inhibitor and Reinhibiting Oil-Filled Transformers", [Verkkosivu] Saatavissa: <https://www.sdmyers.com/knowledge-vault/oxidation-inhibitor-and-reinhibiting-oil-filled-transformers/> [Haettu 26.9.2017].
- [35] Shell, "Shell Product Catalogue", [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.epc.shell.com/> [Haettu 4.7.2017].
- [36] Q. Liu ja Z. D. Wang, "Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids under Standard Lightning Impulse Voltage", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, osa/vuosik. 18, nro 1, ss. 285–294, 2011.
- [37] M&I Materials, *MIDEL eN 1204 Natural Ester Tranformer Fluid (Rapeseed)*, 2017.
- [38] M&I Materials, *MIDEL eN 1215 Natural Ester Transformer Fluid (Soya)*, 2017.

- [39] Cargill, *Envirotemp FR3 fluid*, 2017.
- [40] P. Rozga, "Properties of New Environmentally Friendly Biodegradable Insulating Fluids for Power Transformers", tekijä: *1st Annual International Interdisciplinary Conference*, Azores, 2013.
- [41] C. P. McShane, "Relative Properties of the New Combustion-Resistant Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants for Distribution and Power Transformers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, osa/vuosik. 37, nro 4, ss. 1132–1139, 2001.
- [42] H. Boris, E. Gockenbach ja B. Dolata, "Ester Fluids As Alternative for Mineral Based Transformer Oil", tekijä: *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Futuroscope-Chasseneuil, 2008.
- [43] R. Copley, Haastateltava, *Sales, M&I Materials*. [Haastattelu] 15.8.2017.
- [44] IEC, *IEC 62770 Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment*, Geneve, 2013.
- [45] IEC, *IEC 61099 Insulating liquids - Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes*, Geneve, 2010.
- [46] M&I Materials, *MIDEL 7131 Synthetic Ester Transformer Fluid*, 2017.
- [47] Cargill, *Envirotemp 200 fluid: The Synthetic Ester Solution*, 2017.
- [48] B. Cloet, P. J. Jordaens, J. Nuri ja R. Van Schevensteen, "Cold start of a 5.5MVA offshore transformer", *Transformer Magazine*, 2015.
- [49] Siemens AG, *Design Considerations for Transformers with Alternative Insulating Liquids*, 2017.
- [50] R. Wind, G. J. Pukel, T. Haring, C. Wiery ja S. Winkelbauer, Haastateltavat, [Haastattelu] 24.10.2017.
- [51] G. J. Pukel, R. Schwarz, F. Baumann, H. M. Muhr, R. Eberhardt, B. Wieser ja D. Chu, "Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids", Cigre, 2012.
- [52] IEC, *IEC 60076-14: Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*, Geneve, 2013.

- [53] J. Dai, Z. Wang, P. Dyer, A. Darwin ja I. James, "Investigation of the impregnation of cellulosic insulations by ester fluids", tekijä: *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2007.
- [54] R. Frotscher, "Alternative liquids for tap changers", Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, 2013.
- [55] Ilmatieteen laitos, "Suomen nykyilmasto ja ilmastotilastot", [Verkkosivu] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmasto> [Haettu 25.9.2017].
- [56] L. Arvidsson, Haastateltava, *Toimitusjohtaja, VPdiagnose*. [Haastattelu] 23.8.2017.
- [57] F. Bachinger ja P. Hamberger, "Thermal measurement of an ester-filled power transformer at ultra-low temperatures: steady state", tekijä: *4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management"*, 2017.
- [58] K. Rapp, G. Gauger ja J. Luksich, "Behavior of Ester Dielectric Fluids Near the Pour Point", tekijä: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Austin, 1999.
- [59] CG Power Systems Belgium NV, DuPont International Operations Sàrl, "Over 14 GW – 6000 SLIM® and Bio-SLIM® Transformer Units installed since 2001", 2016.
- [60] N. Knuts, "Cold startup behavior of natural ester based transformer dielectric liquids", Vaasa, 2014.
- [61] W. Wasserberg, H. Borsi ja E. Gockenbach, "A New Method for Drying the Paper Insulation of Power Transformers during Service", tekijä: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Anaheim, 2000.
- [62] Working Group D1.32, "DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria", Cigre, 2010.